

DIE VERAENDERLICHKEIT DER ATMOSPHAERISCHEN
ZIRKULATION,
DARGESTELLT MIT HILFE ENERGETISCHER GROESSEN

DOI 10.3289/IFM_BER_7

Als Habilitationsschrift der Mathematisch-
Naturwissenschaftlichen Fakultät der
Christian-Albrechts-Universität in Kiel

vorgelegt

von

Peter Speth

Kiel 1974

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
Vorbemerkung	1
1. Einleitung	1
2. Die verfügbare potentielle Energie	7
2.1. Die verfügbare potentielle Energie der wandernden Wellen	10
2.2. Die verfügbare potentielle Energie der stehenden Wellen	19
3. Horizontale Flüsse von sensibler und latenter Energie	26
3.1. Horizontale Flüsse von sensibler Energie	28
3.2. Horizontale Flüsse von latenter Energie	32
4. Horizontale Flüsse von Drehmoment	38
5. Spektren der horizontalen Flüsse von sensibler Energie und von Drehmoment	41
6. Der durch besonders intensive außertropische Zyklogen hervorgerufene meridionale Transport an sensibler Wärme und an Drehmoment	45
7. Ausblick	48
8. Zusammenfassung	51
Danksagung	56
Literaturverzeichnis	57
Abbildungen	

VORBEMERKUNG

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit der empirischen Bestimmung der verfügbaren potentiellen Energie und der großskaligen horizontalen Flüsse von sensibler und latenter Energie und von Drehmoment für die Atmosphäre der Nordhalbkugel. Für die Berechnungen standen aerologische Daten auf ca. 80 digitalen Magnetbändern zur Verfügung, die vom Deutschen Wetterdienst übernommen wurden; insgesamt handelt es sich dabei um ungefähr 300 000 000 Zahlen. Die Bearbeitung dieser Vielzahl von Daten erforderte die Erstellung von ca. 60 größeren Computer-Programmen. Zur Komprimierung des Datenmaterials und um den meteorologischen Gehalt einer anschaulichen Betrachtungsweise zugänglich zu machen, erfolgten die Rechnungen im sogenannten "gemischt räumlich-zeitlichen" Bereich. Die Ergebnisse sind aber dennoch so zahlreich, daß hier nur ein Teil aller verfügbaren dargestellt werden kann. Auf sämtliche dabei auftretende teilweise äußerst zeitaufwendige Daten-Organisationsprobleme wird nicht eingegangen, da diese zum Teil schon in vor dieser Arbeit liegenden Veröffentlichungen - die jeweils als Referenz angegeben sind - erwähnt wurden. Die an anderer Stelle zu veröffentlichenden weiteren Ergebnisse werden jeweils aufgeführt. Die Interpretation der Resultate erfolgt hauptsächlich an Hand von Abbildungen; die dort gemachten Zahlenangaben sind zur Überprüfung für entsprechende Ergebnisse aus Modellrechnungen gedacht und werden im Text im einzelnen nicht immer wiederholt.

1. EINLEITUNG

Um einen Überblick über die Allgemeine Zirkulation der Atmosphäre zu erlangen, hat man sich in der Vergangenheit vielfach um eine

Klassifikation der Klimate bemüht. Die bekannteste darunter dürfte dabei die Typisierung von W. KÖPPEN sein, dessen Gliederung sich nach dem Jahresgang der Temperatur der erdboden-nahen Luftschicht und dem Niederschlag richtet. In jüngerer Zeit wurde dann auch ein großes Material über das Klima der freien Atmosphäre veröffentlicht. Hierbei sind vor allem die klimatologischen Karten und Darstellungen des jährlichen Witterungsverlaufes der Nordhemisphäre von R. SCHERHAG et al. (1969, 1970), ein von der WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (1965) herausgegebenes Tabellenwerk über die mittleren Vertikalverteilungen der meteorologischen Größen an den einzelnen Radiosondenstationen, die mittleren Meridionalschnitte von H.L. CRUTCHER (1969) und der Atlas von H.L. CRUTCHER and J.M. MESERVE (1970) zu nennen. Auf die Variabilität der atmosphärischen Zirkulation wird dabei durch die Berechnung der Streuung der verschiedenen meteorologischen Größen in Bezug auf die Zeit eingegangen. Dieses überaus nützliche Material erfüllt jedoch heutzutage nicht mehr alle praktischen und wissenschaftlichen Erfordernisse. Deshalb wurden von der Kommission für Klimatologie der WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (1969) Vorschläge über Referenzmaterial eines neuen Typs für eine Klimatologie der freien Atmosphäre (Aeroklimatologie) gemacht. Danach sollte von Wissenschaftlern derartiges Referenzmaterial zusammengestellt werden, das nicht nur eine "Photographie" des vergangenen und augenblicklichen Zustandes der Atmosphäre wiedergibt, sondern das einen Einblick in die sich abspielenden physikalischen Prozesse gestattet, wobei eine möglichst hohe räumliche und zeitliche Differenzierung zu berücksichtigen ist. Dieses Referenzmaterial kann für eine Überprüfung der Ergebnisse aus mathematisch-physikalischen Mo-

deilen der globalen atmosphärischen Zirkulation herangezogen werden. Die Bedeutung solcher Modellrechnungen für die Langfristwettervorhersage und im Hinblick auf die sich im Zusammenhang mit Klimamodifikationen ergebenden Probleme ist heute unbestritten; die wichtigsten Arbeiten hierzu erfolgten bisher in der Hauptsache in den Vereinigten Staaten von N.A. PHILIPPS (1956), Y. MINTZ (1965), A. ARAKAWA, A. KATAYAMA and Y. MINTZ (1968), C.E. LEITH (1965), A. KASAHARA and W.M. WASHINGTON (1967) und J. SMAGORINSKY, S. MANABE and J.L. HOLLOWAY (1965). Im Rahmen des internationalen "GLOBAL ATMOSPHERIC RESEARCH PROGRAMME" (GARP) befaßt sich in Deutschland jedoch seit 1968 ebenfalls eine Arbeitsgruppe mit einem Simulationsprojekt der Allgemeinen Atmosphärischen Zirkulation. Die Arbeiten hierzu erfolgen in einem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft eingerichteten Schwerpunktprogramm mit dem Titel "Energiehaushalt und Zirkulation der Atmosphäre". Innerhalb dieses deutschen GARP-Beitrages befaßt sich eine weitere Arbeitsgruppe mit der Diagnose empirischer Felder der Allgemeinen Atmosphärischen Zirkulation. Diese Arbeitsgruppe hat die Aufgabe, unter Verwendung der verschiedenen Beobachtungssätze, den atmosphärischen Zustand, seine zeitliche und räumliche Veränderlichkeit und die Energetik der Atmosphäre möglichst objektiv zu erfassen. Ein wesentlicher Punkt ist es dabei, das Zirkulationsgeschehen besser zu verstehen und Vergleichsmöglichkeiten für Ergebnisse von numerischen Modellrechnungen anzubieten. Dazu werden unter anderem in der Abteilung Meteorologie des Instituts für Meereskunde an der Universität Kiel verschiedene Arbeiten geleistet. In diesem Rahmen wurden von P. SPETH (1974a, 1974b) Vergleichsmöglichkeiten für Modelle auf energetischer Grundlage dargestellt. Dafür werden das Kon-

zept der verfügbaren potentiellen Energie nach E.N. LORENZ (1955) und hemisphärische großskalige horizontale Flüsse von sensibler und latenter Energie und von Impuls herangezogen; die Berechnung dieser Größen entspricht auch den von der WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION ausgearbeiteten Vorschlägen.

Als Datenmaterial für diese eben genannten Untersuchungen dienten die zweimal täglich auf Magnetband gespeicherten Analysen und Radiosondenaufstiege des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach/Main.. Um das gesamte äußerst umfangreiche Material für eine meteorologische Interpretation überschaubar zu machen, wurden die Rechnungen in Anlehnung an die Arbeiten von V.P. STARR (1951, 1953, 1959), R.M. WHITE (1949, 1951) und V.P. STARR and R.M. WHITE (1952) im sogenannten gemischt räumlich-zeitlichen Bereich ("mixed space-time domain") durchgeführt. Dabei wird eine zu betrachtende Größe sowohl einer räumlichen als auch zeitlichen Mittelbildung unterworfen. Wendet man dieses Verfahren zum Beispiel auf den meridionalen Fluß $E \cdot v$ (E : Energie, v : meridionale Windkomponente) an, so erhält man nach mehreren Umformungen^{+) :}

$$E(t) = [E]_{(\lambda, t)} [v]_{(\lambda, t)} + [(E)_{(t)}]_{(\lambda)} [(v)_{(t)}]_{(\lambda)} + [(E)_{(t)} (v)_{(t)}]_{(\lambda, t)} \quad (1)$$

oder in symbolischer Form

$$E = \text{MMC} + \text{MSE} + \text{TE} \quad (2)$$

Zur Vermeidung von Mißverständnissen wird für die durchzuführenden Mittelungsoperationen die von E.R. REITER (1969) vorgeschlagene Nomenklatur benutzt, wonach Mittelwerte durch eckige Klammern und Abweichungen davon durch runde Klammern gekennzeichnet werden. Der Parameter über den gemittelt bzw. von dem Abweichungen gebildet werden, wird durch einen in Klammern gesetzten Index angedeutet; Indices nicht in Klammern haben die übliche Bedeutung. Die Größe E läßt sich dann also zum Beispiel durch das zonale Mittel $[E]_{(\lambda)}$ und die Abweichung von zonalen Mittel $(E)_{(\lambda)}$ ausdrücken, also $E = [E]_{(\lambda)} + (E)_{(\lambda)}$.

Das erste Glied auf der rechten Seite repräsentiert den Transport der Größe E durch die zonal und zeitlich gemittelte meridionale Windkomponente und gibt daher denjenigen Beitrag zum totalen Transport an, der durch die mittlere Meridionalzirkulation hervorgerufen wird (MMC: "mean meridional circulation"). Der zweite Term stellt einen Transport dar, der von der räumlichen Kovarianz der zeitlichen Mittelwerte der Abweichungen von den zonalen Mittelwerten abhängt, und stellt damit den durch die mittleren stehenden langen Wellenstörungen hervorgerufenen Anteil dar (MSE: "mean standing eddies"). Das dritte Glied hängt ab von den Abweichungen der augenblicklichen Werte von den zeitlichen Mitteln und beschreibt dadurch den Beitrag der wandernden langen Wellenstörungen (TE: "transient eddies"). Die Summe aus den drei Termen auf der rechten Seite von (1) ergibt dann den Gesamtfluß (TOC: "total circulation"). Eine ähnliche Beziehung läßt sich auch für die verfügbare potentielle Energie selbst gewinnen; dies ist in Abschnitt 2 kurz wiedergegeben. Die bei der abkürzenden Schreibweise (2) aufscheinenden Symbole werden im folgenden als Indices geschrieben.

In den Untersuchungen von P. SPETH (1974a, 1974b) wurden die Mittelwerte des Gesamtzeitraumes 1967 bis 1972 betrachtet; die Berechnungen erfolgten jeweils für den Januar als repräsentativ für den Winter und für den Juli als repräsentativ für den Sommer. Durch eine zeitliche Aufschlüsselung der Flächenmittel der verfügbaren potentiellen Energie in jeden einzelnen Januar und Juli aus dem Gesamtzeitraum 1967 bis 1972 traten Anomalien im Zirkulationsverhalten deutlich hervor (vgl. P. SPETH, 1974a: Abb. 16). Im folgenden Abschnitt 2 erfolgt die Erklärung dieser Veränderlichkeit durch eine Diskussion der Horizontalverteilungen der

Einzelmonate. Da die Veränderung der verfügbaren potentiellen Energie sicher nicht unabhängig von den großskaligen Horizontaltransporten von sensibler und latenter Energie und von Bewegungsmoment ist, werden diese Flüsse der Einzelmonate in Abschnitt 3 einer gesonderten Untersuchung unterworfen. Dabei wird der Versuch gemacht, sowohl die verfügbare potentielle Energie als auch die verschiedenen Flüsse in Abhängigkeit vom zonalen Index zu erklären. Um die Wirkung einer einzelnen synoptischen Störung festzustellen, werden in Abschnitt 6 die mit besonders stark ausgebildeten extratropischen Zyklonen verbundenen Transporte von sensibler Energie und von Impuls näher durchleuchtet. Zur Bestimmung des Anteils von Wellen verschiedener Perioden an dem gesamten durch die wandernden Wellen hervorgerufenen Fluß erfolgt vorher noch in Abschnitt 5 eine Berechnung der Co-Spektren der Flüsse am Ozean-Wetterschiff "C". Nach Ansicht des Verfassers bilden diese Berechnungen geeignete Möglichkeiten zur Überprüfung numerischer Modelle.

Folgende Symbole werden in dieser Arbeit benutzt:

- x Koordinate positiv nach Osten
- y Koordinate positiv nach Norden
- z zum Zenit gerichtete Koordinate
- t Zeit
- p Luftdruck
- ϕ geographische Breite (positiv nach Norden)
- λ geographische Länge (positiv nach Osten)
- \vec{u} horizontaler Windvektor mit den Komponenten $\{u, v\}$
- w vertikale Geschwindigkeitskomponente
- E verfügbare potentielle Energie
- g Schwerebeschleunigung
- T Temperatur
- P Gaskonstante der Luft
- R = $a \cos \phi$ Abstand von der Erdachse
- c_p spezifische Wärme der Luft bei konstantem Druck

κ = R/c_p Poisson-Konstante
 q spezifische Feuchte
 L Verdampfungswärme
 a Erdradius

Alle anderen benutzten Symbole gehen eindeutig aus dem jeweiligen Zusammenhang hervor.

2. DIE VERFUEGBARE POTENTIELLE ENERGIE

Als Datenmaterial für die Berechnung der verfügbaren potentiellen Energie wurden die Analysen der Nordhalbkugel des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach/Main, herangezogen; die Daten sind in insgesamt sieben Standard-Druckflächen zwischen 1000 mb und 100 mb an quadratischen Gitterpunkten (nicht geographische Koordinaten) auf einer stereographischen polständigen Azimutalprojektion zweimal täglich seit dem Jahre 1967 gegeben. Um für Schnittpunkte von Längen- und Breitenkreisen rückrechnen zu können, wurde für die Datenverarbeitung die von K. ARPE (1971) entwickelte Methode der Analyse skalarer meteorologischer Felder mit Hilfe von Kugelflächenfunktionen herangezogen; dadurch können dann auch die Beiträge der stehenden Wellen in Bezug auf einzelne Wellenzahlen unterschieden werden. Der Gang der Rechnungen ist bei P. SPETH (1974a) geschildert.

Aufbauend auf die berühmt gewordene Arbeit "Über die Energie der Stürme" von M. MARGULES (1903) wurde von E.N. LORENZ (1955) unter allgemeinen Bedingungen ein analytischer Ausdruck für die verfügbare potentielle Energie abgeleitet. Die Überlegungen basieren auf dem Grundgedanken, daß die Atmosphäre dazu neigt, durch Massenumlagerungen einen Gleichgewichtszustand einzunehmen. Setzt man voraus, daß die dabei auftretenden Bewegungen adiabatisch erfolgen sollen, so kann man die Differenz $A = (P + I) - (P + I)_e$ als verfügbar zur Umwandlung in kine-

tische Energie betrachten⁺). Wie J. VAN MIEGHEM (1956) gezeigt hat, besitzt die totale potentielle Energie für den Gleichgewichtszustand ein Minimum; deshalb gibt die Differenz A gleichzeitig den maximal möglichen Gewinn an kinetischer Energie an. Die verfügbare potentielle Energie hängt nur von der Massenverteilung in der Atmosphäre ab, oder anders ausgedrückt von der Neigung der isentropen Flächen gegen die Horizontale.

Die Bedeutung der verfügbaren potentiellen Energie wird erkennbar aus einem kurzen Überblick über den Energiehaushalt der Nordhemisphäre. Im langzeitlichen Mittel wird durch diabatisch differenziert erfolgende Erwärmung der Troposphäre (Erwärmung der relativ wärmeren Luft in niederen und Abkühlung in höheren Breiten) zonale verfügbare potentielle Energie erzeugt. In dem Maße, in dem die zonale verfügbare potentielle Energie anwächst, führen die sich verstärkenden horizontalen thermischen Gradienten zu barokliner Instabilität und damit zum Wachstum von Wirbeln⁺⁺). Auf diese Weise steigt die turbulente verfügbare potentielle Energie auf Kosten der zonalen verfügbaren potentiellen Energie

⁺)
P bezeichnet die potentielle und I die innere Energie; der Index e (equilibrium) bezieht sich dabei auf den Gleichgewichtszustand. Die Summe $P + I$ bezeichnet man als totale potentielle Energie.

⁺⁺)
Wenn in dieser Arbeit von Turbulenz gesprochen wird, sind damit stets die großskaligen Abweichungen von zonal oder zeitlich gemittelten Feldern gemeint, die groß genug sind, daß man sie mit dem synoptischen Stationsnetz fassen kann. Nur in diesem Fall wird durch solche Turbulenz der Zonalbewegung kinetische Energie zugeführt, während zonale kinetische Energie in kleindimensionierten turbulenten Wirbeln natürlich durch Reibung dissipiert wird, vgl. I.P. STARR (1966).

an, da nun ein verstärkt nordwärts gerichteter Wärmetransport zum Abbau der übermäßigen Temperaturgradienten Anlaß gibt, der im wesentlichen den entsprechenden Umwandlungsterm bestimmt. Während ein Teil der auf diese Weise angestiegenen turbulenten verfügbaren potentiellen Energie durch nichtadiabatische Abkühlung vernichtet wird, wird durch Aufsteigen von Warm- und Absinken von Kaltluft der größte Teil in turbulente kinetische Energie umgesetzt. Diese wird teils durch Reibung dissipiert und teilweise in zonale kinetische Energie umgewandelt, die ihrerseits zum größten Teil durch Reibung aufgezehrt wird und zu einem kleineren Teil wieder in zonale verfügbare potentielle Energie zurückumgesetzt wird. Wie von P. SPETH (1972b) in einer Detailstudie gezeigt wurde, wird gerade dann viel verfügbare potentielle Energie in kinetische Energie umgesetzt, wenn die turbulente verfügbare potentielle Energie ein Maximum aufweist. Aus diesem Grunde ist die Betrachtung der verfügbaren potentiellen Energie vor allem für die Entstehung intensiver Zyklogen von Wichtigkeit.

Im gemischt räumlich-zeitlichen Bereich kann man die Formeln der verfügbaren potentiellen Energie aus P. SPETH (1974a) entnehmen; es ergibt sich für die verfügbare potentielle Energie des zonal und zeitlich gemittelten Massenfeldes (im folgenden kurz "zonale" verfügbare potentielle Energie genannt):

$$A_{MMC} = \frac{1}{2g} \int \gamma ([T]_{(\lambda, t)})^2_{(F)} dp, \quad (3)$$

für die verfügbare potentielle Energie der stehenden Wellen:

$$A_{MSE} = \frac{1}{2g} \int \gamma \left[([T]_{(t)})^2_{(\lambda)} \right]_{(\lambda)} dp, \quad (4)$$

und für die verfügbare potentielle Energie der wandernden Welle

$$A_{TE} = \frac{1}{2g} \int \gamma \left[([T]_{(t)})^2 \right]_{(\lambda, t)} dp. \quad (5)$$

Die totale verfügbare potentielle Energie ergibt sich aus der Summe aller dieser Beiträge und wird als A_{TOC} bezeichnet:

$$A_{TOC} = A_{MMC} + A_{MSE} + A_{TE} \quad (6)$$

Die Integration wird dabei zwischen zwei Druckflächen durchgeführt, wobei die Integrationsgrenzen der Einfachheit halber wie auch im folgenden nicht mitgeschrieben werden. Der Index "F" kennzeichnet ein Flächenmittel auf einer Druckfläche bzw. die Abweichung von diesem Flächenmittel. Der Faktor γ stellt ein Maß für die Stabilität der Atmosphäre dar und ist gegeben durch:

$$\gamma = - \frac{R}{p} \left(\frac{\partial [T]}{\partial p} (\lambda, \phi) - \kappa \frac{[T]}{p} (\lambda, \phi) \right)^{-1} \quad (7)$$

Wie man aus der Abb. 1 entnimmt, besitzt dieser Faktor in der mittleren Troposphäre seinen größten Wert; dies rührt daher, daß in dieser Höhe die Differenz zwischen dem tatsächlichen Temperaturgradienten $\frac{\partial [T]}{\partial p} (\lambda, \phi)$ und dem adiabatischen Temperaturgradienten $\kappa \frac{[T]}{p} (\lambda, \phi)$ am kleinsten ist. Dargestellt ist ein aus dem sechsjährigen Januar-Mittel der Temperatur berechneter Stabilitätsfaktor, da für die Einzelmonate keine erkennbaren Unterschiede bestehen; dies gilt ebenso für den Juli. Die Rechnungen wurden jedoch mit den tatsächlichen Faktoren der einzelnen Monate durchgeführt.

Im folgenden wird öfters Bezug auf die bei P. SPETH (1974a) diskutierten sechsjährigen Mittelwerte 1967-1972 genommen, ohne daß jedesmal darauf hingewiesen wird. Weitere kartenmäßige Darstellungen sind bei P. SPETH (1974c, 1974d) zu finden.

2.1. DIE VERFUEGBARE POTENTIELLE ENERGIE DER WANDERNDEN WELLEN

Man entnimmt der Abb. 2, daß im zonalen sechsjährigen Mittel im Januar gegenüber dem Juli durch die wandernden Wellen über weite

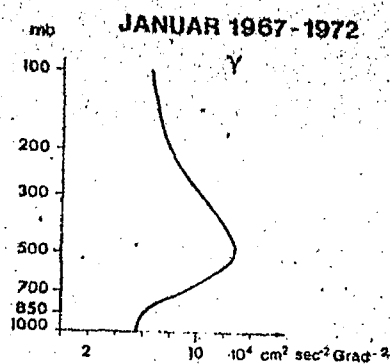


ABB. 1

Vertikalprofil des Stabilitätsfaktors γ .

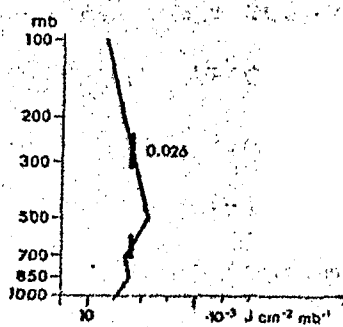
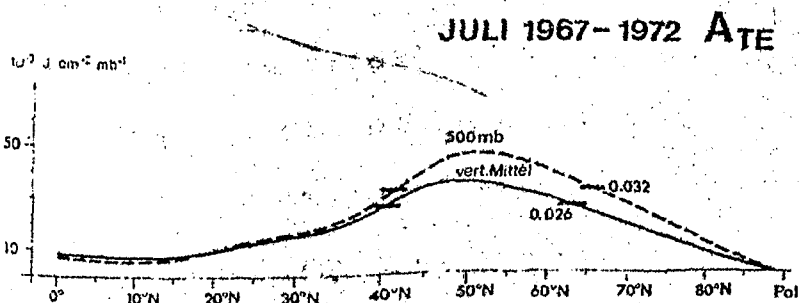
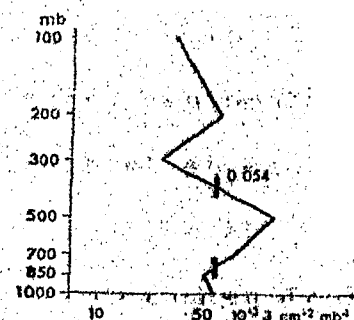
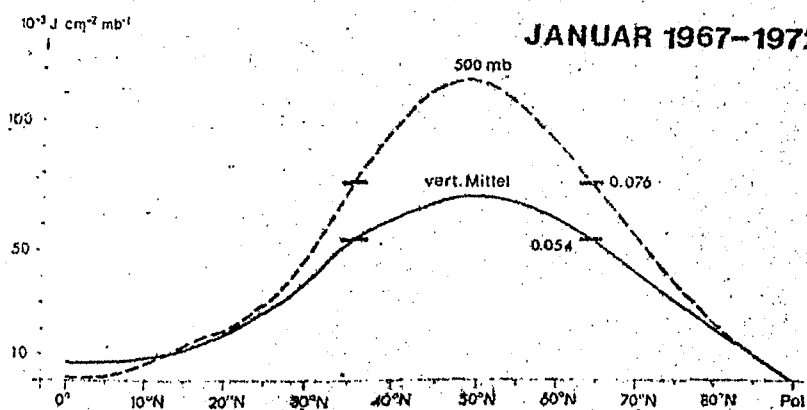


ABB. 2

Mit dem Cosinus der geographischen Breite gewichtete zonale Mittel (links) und Vertikalprofile der Flächenmittel (rechts) der durch die wandernden Wellen hervorgerufenen turbulenten verfügbaren potentiellen Energie für den Januar und Juli aus dem Gesamtzeitraum 1967 bis 1972. Die vertikalen Mittelwerte sind durch dicke senkrechte oder waagrechte Striche mit Zahlenangaben in $J\ cm^{-2}\ mb^{-1}$ angedeutet.

Bereiche der Nordhalbkugel hohe Energievorräte hervorgerufen werden. Im Flächenmittel nimmt A_{TE} im Januar einen Wert von $0,054 \text{ J cm}^{-2} \text{ mb}^{-1}$ und im Juli dagegen nur einen Wert von $0,026 \text{ J cm}^{-2} \text{ mb}^{-1}$ an. Während im vertikalen Profil im Januar ein ausgeprägtes Maximum in 500 mb vorhanden ist, findet man im Juli dagegen in der Vertikalen geringere Gegensätze vor, wie man auch aus den ebenfalls in der Abb. 2 dargestellten zonalen Mittelwerten für das 500 mb-Niveau entnehmen kann. Um dies zu erklären, ist in der Abb. 3 als Beispiel der Temperaturverlauf für das Jahr 1964 in 850 mb, 500 mb und 300 mb am Ozeanwetterschiff "C" dargestellt ($53^{\circ}\text{N}/36^{\circ}\text{W}$). Diese Messungen sind ein Teil sämtlicher vom U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE - NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION auf Magnetband übernommenen Radiosondenaufstiege vom Juni 1946 bis Juni 1966. Diese Daten werden hauptsächlich in Abschnitt 5 bei der Berechnung von Energiespektren benötigt, und wurden zur Abschätzung der verfügbaren potentiellen Energie in diesem Abschnitt sonst nicht weiter benutzt; diese Abb. 3 soll nur anschaulich machen, daß in der Höhe der mittleren Troposphäre besonders große Temperaturänderungen vorkommen (die Streuung der Temperatur beträgt in 850 mb: $6,2^{\circ}\text{C}$, in 500 mb: $6,9^{\circ}\text{C}$ und in 300 mb: $4,2^{\circ}\text{C}$). Diese starken Schwankungen kommen dadurch zustande, daß im 500 mb-Niveau die horizontalen Temperaturgegensätze am ausgeprägtesten sind und häufig erfolgende Luftmassenwechsel in dieser Höhe große Werte von A_{TE} hervorrufen; dies wird nach Abb. 1 durch den dort besonders großen Faktor γ noch unterstützt.

Eine weitere Detaillierung der eben diskutierten zonalen Mittelwerte kann man den - hier nicht wiedergegebenen - Horizontalverteilungen von A_{TE} entnehmen. Man findet, daß im Januar der

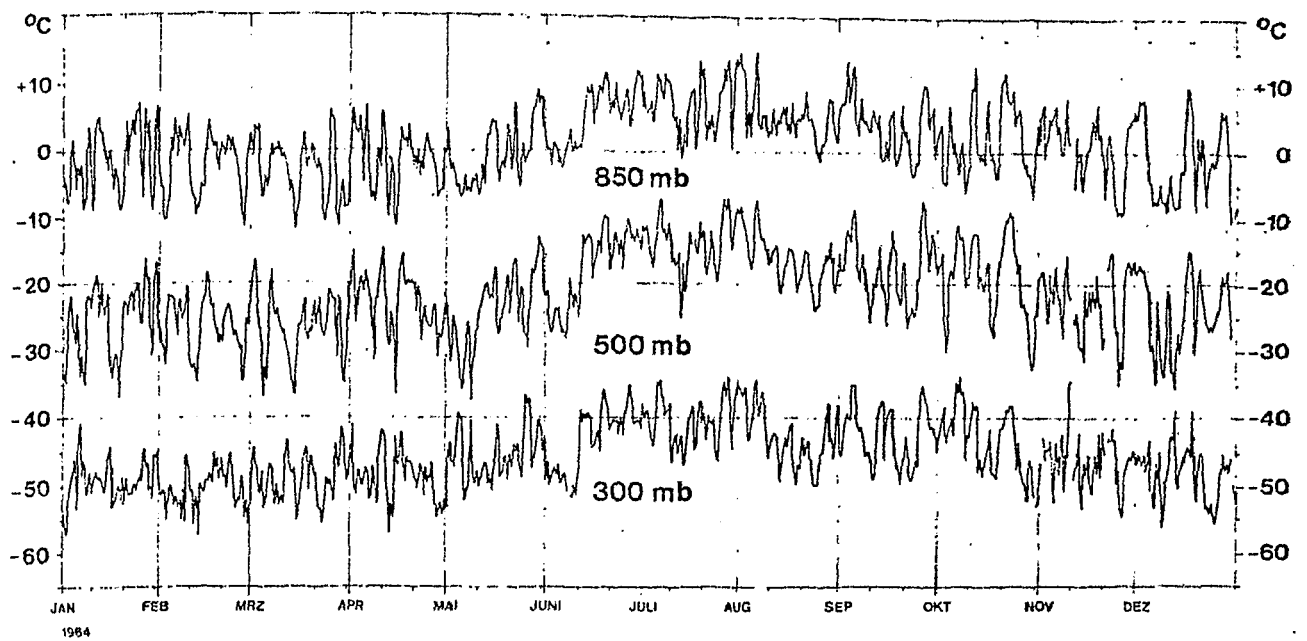


ABB. 3

Temperaturverlauf für das Jahr 1964 am Ozeanwetterschiff "C" ($53^{\circ}\text{N}/36^{\circ}\text{W}$) in 850, 500 und 300 mb.

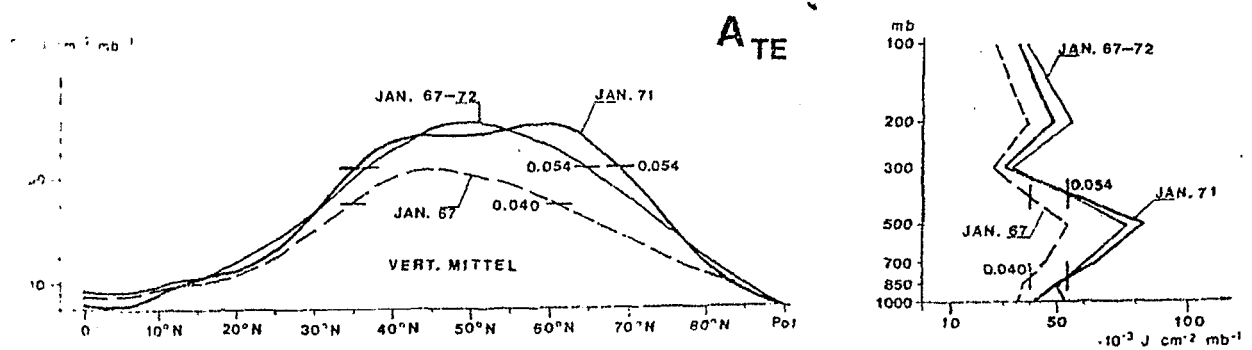


ABB. 4

Tonale Mittel und Vertikalprofile der durch die wandernden Wellen hervorgerufenen verfügbaren potentiellen Energie für den Januar 1967, Januar 1971 und den Januar 1967 bis 1972. Sonst wie Abb. 2.

Extremwert in 50°N beim zonalen Mittel durch häufig und heftig erfolgende Kalt- bzw. Warmluftvorstöße über Kanada (maximal $0,20 \text{ J cm}^{-2} \text{ mb}^{-1}$ im vertikalen Mittel), dem Ostteil von Sibirien (maximal $0,17 \text{ J cm}^{-2} \text{ mb}^{-1}$) und der Bering-Straße (maximal $0,16 \text{ J cm}^{-2} \text{ mb}^{-1}$) entsteht. Anders sind dagegen die Verhältnisse im Juli. Da zu dieser Jahreszeit auf Grund der geringen Aktivität der atmosphärischen Zirkulation weniger und schwächere Kalt- bzw. Warmluftvorstöße erfolgen, sind die Extremwerte auf $0,09 \text{ J cm}^{-2} \text{ mb}^{-1}$ herabgesetzt. Im Unterschied zum Januar findet man dagegen einen fast geschlossenen Gürtel mit hohen Werten von A_{TE} in der Umgebung des 50° Breitenkreises. Führt man eine zeitliche Aufschlüsselung in jeden einzelnen Januar aus dem Gesamtzeitraum 1967 bis 1972 durch, so findet man starke Unterschiede bei der durch die wandernden Wellen hervorgerufenen verfügbaren potentiellen Energie vor. Um eine Erklärung für diese Veränderlichkeit zu erlangen und um Modellrechnern einen Einblick zu geben, zwischen welchen Grenzen die verfügbare potentielle Energie schwanken kann, sollen die Extremwerte aus den sechs verschiedenen Januar-Monaten näher untersucht werden; als ausgesprochenes Minimum erweist sich der Januar 1967 und als Maximum der Januar 1971. Die zonalen Mittelwerte und Vertikalprofile sind für diese Monate in Abb. 4 zusammen mit dem sechsjährigen Mittelwert dargestellt. Während man im sechsjährigen Mittel das Maximum bei 50°N mit $0,071 \text{ J cm}^{-2} \text{ mb}^{-1}$ vorfindet, liegt im Januar 1967 das Maximum weiter südlich bei 45°N und ist mit $0,053 \text{ J cm}^{-2} \text{ mb}^{-1}$ um fast ein Drittel kleiner. Im Januar 1971 dagegen beobachtet man sehr hohe Werte im gesamten Breitenbereich zwischen 40°N und 65°N mit einem größten Wert von $0,071 \text{ J cm}^{-2} \text{ mb}^{-1}$ bei 60°N . Aus dem Vertikalprofil (Abb. 4 recht

erkennt man, daß A_{TE} im Januar 1971 durch die ganze betrachtete Luftschicht - mit einer ausgeprägten Spitze in 500 mb - größer als im Januar 1967 ist. Eine anschauliche Erklärung dieser völlig verschiedenen Extremwerte entnimmt man den Abb. 5 und 6, in denen die entsprechenden Horizontalverteilungen wiedergegeben sind. In diese Karten ist ebenfalls noch die mittlere Lage der Polarfront im 500 mb-Niveau eingezeichnet; nach Fr. DEFANT (1958) und K. BAESE (1973) findet man diese entlang einer Leitisotheime mit einem Wert von -29°C im Januar und -20°C im Juli. Im Januar 1971 (Abb. 5) erfolgten kräftige Luftmassenwechsel über dem östlichen Teil von Nordamerika ($0,23 \text{ J cm}^{-2} \text{ mb}^{-1}$), über Neufundland ($0,18 \text{ J cm}^{-2} \text{ mb}^{-1}$), über dem Nordatlantik ($0,17 \text{ J cm}^{-2} \text{ mb}^{-1}$), über Asien ($0,25 \text{ J cm}^{-2} \text{ mb}^{-1}$) und über der Bering-Straße ($0,27 \text{ J cm}^{-2} \text{ mb}^{-1}$). Diese Maximalwerte zusammen mit der großen Nord-Süd-Erstreckung der durch die wandernden Wellen hervorgerufenen verfügbaren potentiellen Energie sind ein anschauliches Beispiel dafür, mit welcher Intensität sich in diesem Monat die atmosphärische Zirkulation geändert haben muß. Im Januar 1967 (Abb. 6) haben dagegen in der gesamten Nordhemisphäre wesentlich weniger Veränderungen im Zirkulationsgeschehen stattgefunden; die größten Werte sind teilweise um fast die Hälfte kleiner als im Januar 1971 und konzentrieren sich auf einen schmalen bandartigen Bereich um die mittlere Lage der Polarfront in 500 mb herum, wo die Variabilität der Temperatur groß ist.

Zur Erklärung der Unterschiede zwischen den Abb. 5 und 6 wird der zonale Index im 500 mb-Niveau herangezogen. Dieser ist ein Maß für die mittlere Stärke des Westwindes in gemäßigten Breiten und wird definiert durch:

$$ZI = - \frac{g}{f_{45}} \frac{\Delta z_{55-35}}{\Delta y} ; \quad (8)$$

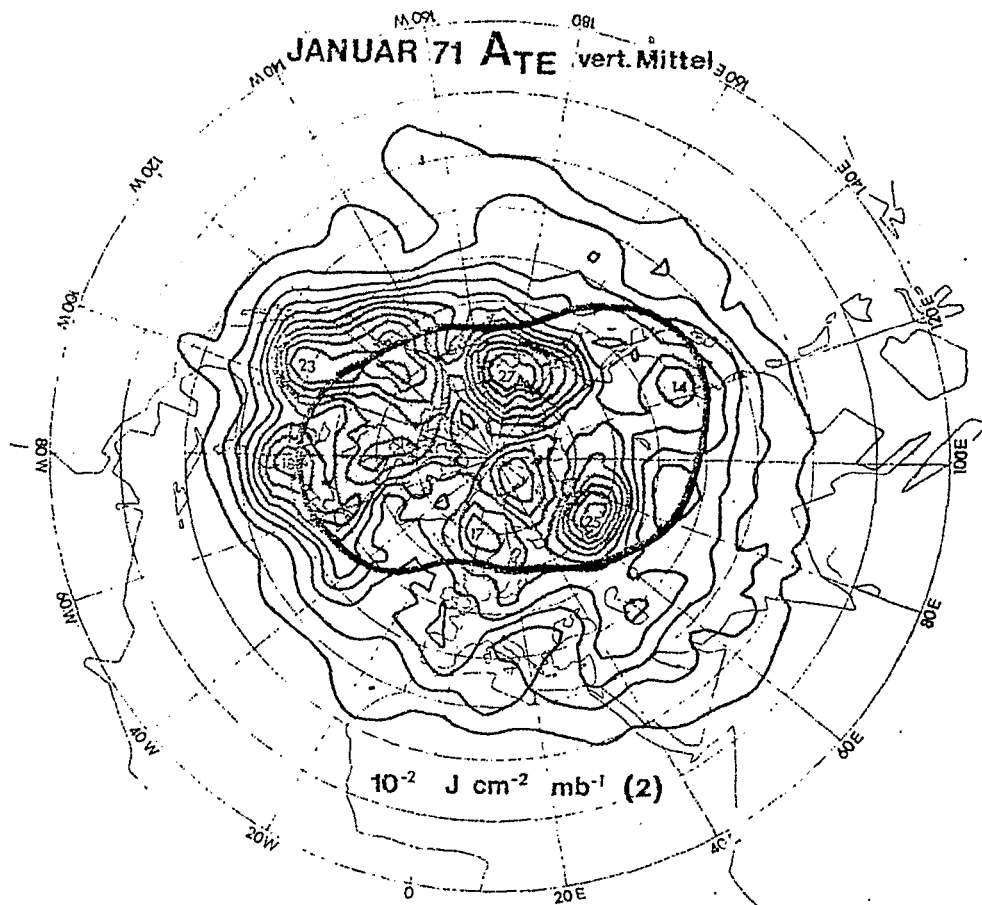


ABB. 5

Vertikales Mittel der turbulenten verfügbaren potentiellen Energie der wandernden Wellen im Januar 1971. Gebiete mit >12 Einheiten sind dunkel schraffiert. Die mittlere Lage der Polarfront in 500 mb ist durch die dick ausgezogene Linie gekennzeichnet. Der Isolinienabstand ist hinter der Dimensionsangabe in Klammern gesetzt.

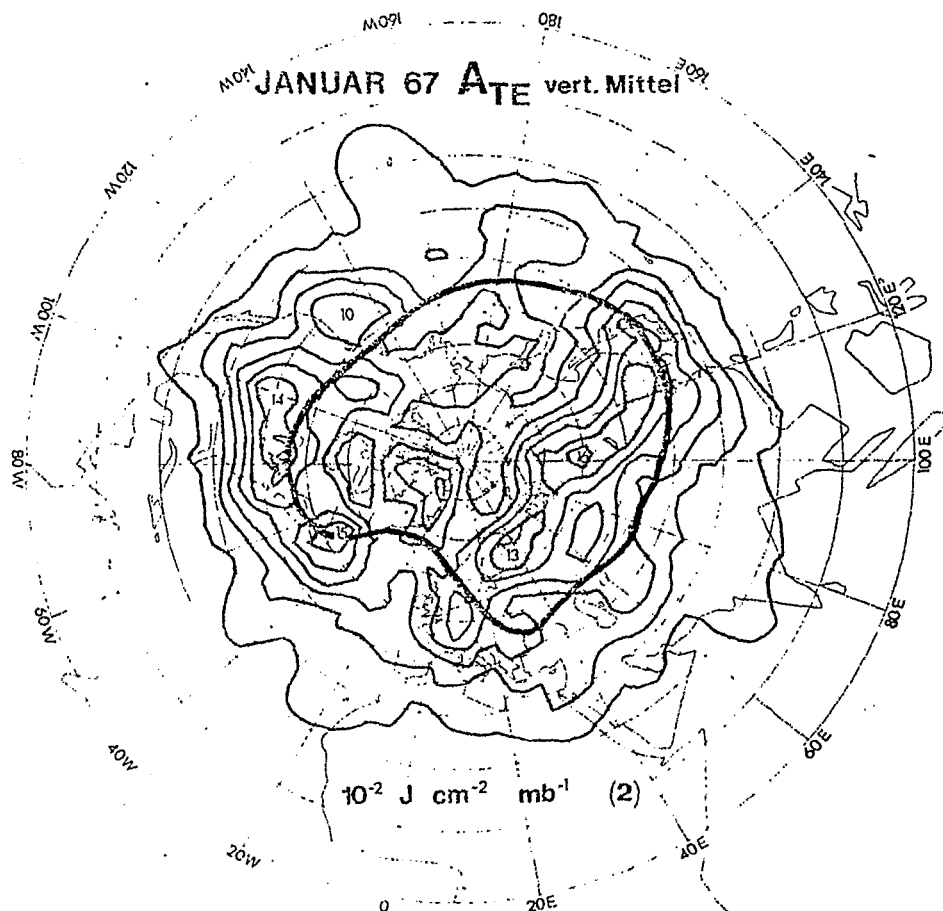


ABB. 6

Vertikales Mittel der turbulenten verfügbaren potentiellen Energie der wandernden Wellen im Januar 1967. Sonst wie Abb. 5

f_{45} ist der Coriolis-Parameter in 45°N ; Δz_{55-35} gibt dabei die Differenz der Höhe der 500 mb-Fläche zwischen 55°N und 35°N an. Ein relativ hoher Wert des über mehrere Längengrade gemittelten zonalen Index kennzeichnet eine sehr zonal ausgerichtete Strömung während ein niedriger Wert bedeutet, daß man starke Mäandrierungen in der Zirkulation vorfindet; vgl. hierzu E.W. WAHL (1972) und Y. ARAI (1971). In Abb. 7 sind die zonalen Indices als Breitenkreismittel für jeden einzelnen Tag des Januar 1967 und des Januar 1971 aufgetragen. Diese Zahlen wurden aus den Analysen der geopotentiellen Höhe des Deutschen Wetterdienstes mit Hilfe einer Kugelflächenfunktions- und Fourieranalyse gewonnen. Man entnimmt dieser Abbildung zunächst einmal, daß im Januar 1971 im zeitlichen Mittel der zonale Index mit $14,9 \text{ m sec}^{-1}$ um $1,1 \text{ m sec}^{-1}$ kleiner war als im Januar 1967 ($16,0 \text{ m sec}^{-1}$). Dies deutet darauf hin, daß im Januar 1971 ein stärkerer Luftmassenaustausch erfolgte, der dann die hohen Werte der verfügbaren potentiellen Energie A_{TE} verursachte. Noch deutlicher erkennt man dies aus dem in Abb. 8 dargestellten zeitlichen Verlauf des zonalen Index (der ursprünglich als ein Mittelwert über mehrere Längengrade definiert wurde für verschiedene Geographische Längen; es wurden dabei solche Längengrade ausgewählt, auf denen in den Abb. 5 und 6 die Extremas von A_{TE} zu finden sind. Da nach J.W. POSEY (1971) der Januar 1971 durch besonders starke Wellenbildungen und -verlagerungen mit großer Amplitude vor allem über den USA und zum Teil auch über Asien ausgezeichnet war, beobachtet man für die dargestellten Längengrade starke Wechsel von Perioden mit hoher Zonalität (großer zonaler Index) und hoher meridional ausgerichteter Luftströmung (kleiner zonaler Index); die größte Veränderlichkeit zeigt sich am Meridian 80°W , wo der hohe zonale Index mit

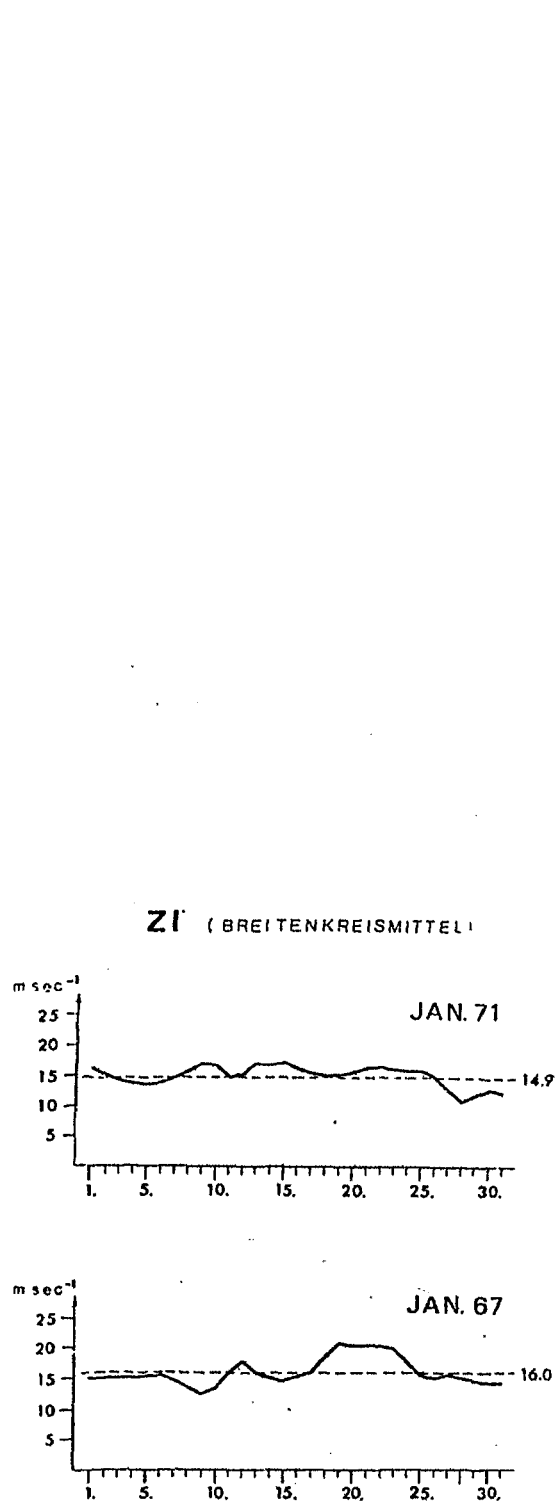


ABB. 7

Das Breitenkreismittel des zonalen index für den Januar 1971 und Januar 1967. Auf der Abszisse sind jeweils die 00 GMT-Termine vom 1. bis zum 31. des Monats abgetragen. Die gestrichelte horizontale Linie gibt das Monatsmittel an.

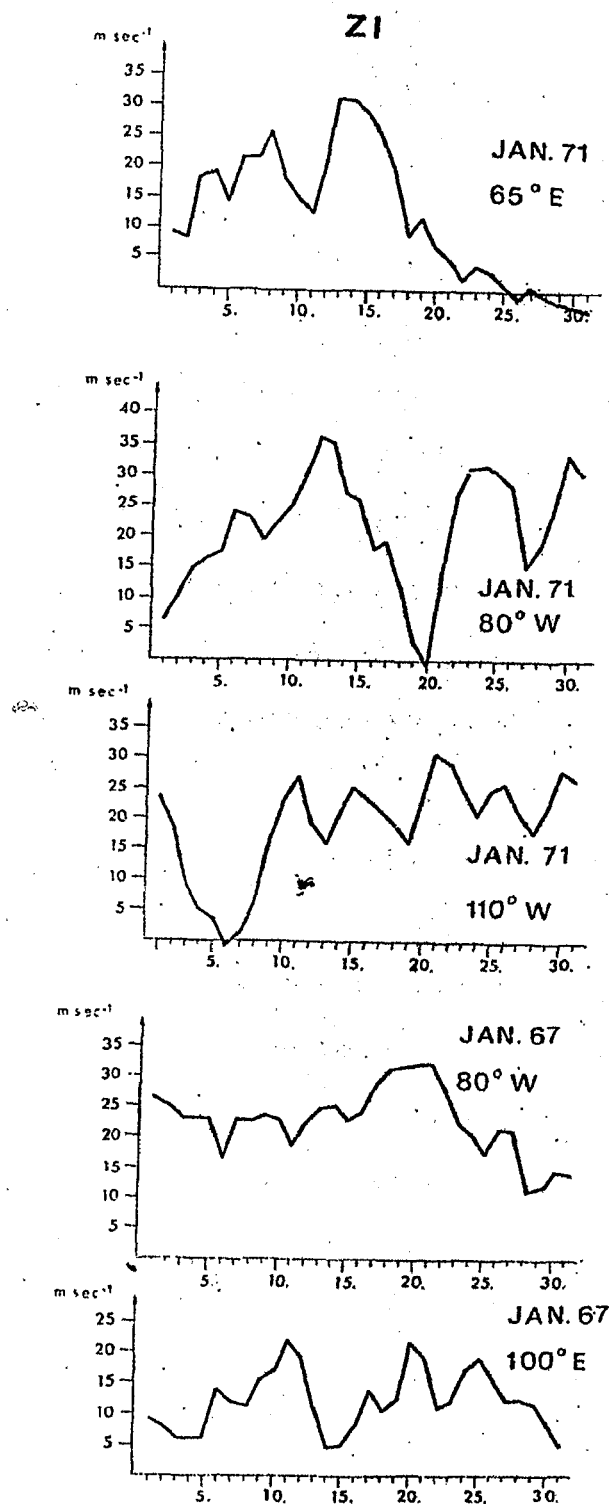


ABB. 8

Der zonale Index für verschiedene Längengrade für den Januar 1971 und Januar 1967. Sonst wie Abb. 7.

36,2 m sec⁻¹ am 12.1.1971 auf -0,1 m sec⁻¹ am 20.1.1971 abfiel. Im Unterschied dazu war der Januar 1967 nach W.R. WINKLER (1967) im westlichen Teil der Nordhalbkugel ein Monat mit ungewöhnlich hohen zonalen Indices, die längere Zeit während des ganzen Monats andauerten; dies erkennt man deutlich aus dem in Abb. 8 für 80°W dargestellten zeitlichen Verlauf. Über Asien findet man bei 100°E im Januar 1967 zwar relativ niedrige Werte des zonalen Index; da diese Werte sich aber im Laufe der Zeit geringfügiger als zum Beispiel im Januar 1971 bei 65°E änderten, sind damit auch die Werte für A_{TE} wesentlich kleiner. Zusammenfassend kann man also sagen, daß diejenigen Monate, die durch besonders starke Wellenbildungen und -verlagerungen gekennzeichnet sind, im Breitenkreismittel relativ kleine zonale Indices aufweisen; an einzelnen Längenkreisen treten dabei starke Schwankungen des zonalen Index auf. Die durch diesen Zirkulationstyp hervorgerufenen großen Werte von A_{TE} in Abb. 5 erstrecken sich über einen großen Breitenbereich, was dann auch in den zonalen Mitteln (Abb. 4) zum Ausdruck kommt. Bei geringer meridionaler Aktivität und damit verbundenen hohen Werten des zonalen Index findet man schwache Werte von A_{TE} , die nur über ein kleines Breitenintervall verteilt sind (Abb. 6). Nach der synoptischen Erfahrung des Verfassers dürften dabei die in den Abb. 5 und 6 dargestellten Feldverteilungen auch bei Betrachtung eines anderen Zeitraumes nicht unter- bzw. überschritten werden. Die Ergebnisse von Modellrechnungen müßten sich also je nach dem Zirkulationstyp etwa zwischen den beschriebenen Extremwerten bewegen. Als Anhaltspunkt für einen solchen Vergleich der Werte von A_{TE} könnte dabei der in Abb. 8 dargestellte zeitliche Verlauf des zonalen Index an einigen Längenkreisen herangezogen werden.

In den einzelnen Sommermonaten weisen die durch die wandernden Wellen hervorgerufenen Flächenmittel der verfügbaren potentiellen Energie entsprechend der herabgesetzten Aktivität der atmosphärischen Zirkulation nur geringe Schwankungen auf. Als ein Minimum ergibt sich der Juli 1967 mit $0,018 \text{ J cm}^{-2} \text{ mb}^{-1}$ und als ein Maximum der Juli 1972 mit $0,023 \text{ J cm}^{-2} \text{ mb}^{-1}$. Die in Abb. 9 dargestellten zonalen Mittelwerte und Vertikalprofile dieser beiden Monate weisen bei herabgesetzten Beträgen ähnliche Verteilungen wie das sechsjährige Mittel auf; die größten Werte liegen dabei in jedem Fall bei 50°N . In dieser Abb. 9 fällt besonders auf, daß der Juli 1972 kleinere Werte als der Gesamtzeitraum 1967 bis 1972 aufweist, obwohl er ein Maximum im Flächenmittel von A_{TE} im Vergleich zu den anderen Juli-Monaten darstellt. Dieser vermeintliche Widerspruch liegt darin begründet, daß bei der Berechnung für die Einzelmonate nach Formel (5) die Abweichungen von dem jeweiligen zeitlichen Mittel jedes einzelnen Monats gebildet wurden, während bei dem sechsjährigen Zeitraum das Temperaturmittel aller sechs Juli- (bzw. Januar-) Monate genommen wurde. Dadurch ist der Wert für A_{TE} des sechsjährigen Zeitraumes größer als das arithmetische Mittel aus der für jeder Monat separat berechneten durch die wandernden Wellen hervorgerufenen verfügbaren potentiellen Energie⁺ (Fußnote S. 17).

Während in den vertikalintegrierten Flächenmitteln nur eine geringe Veränderlichkeit in Bezug auf die Zeit auftritt, werden die Unterschiede dagegen deutlicher bei den Horizontalverteilungen (Abb. 10 und 11). Im Juli 1972 (Abb. 10) findet man in der Umgebung des 50. Breitenkreises einen fast geschlossenen Ring mit relativ hohen Werten der durch die wandernden Wellen verursachten verfügbaren potentiellen Energie von Japan über den

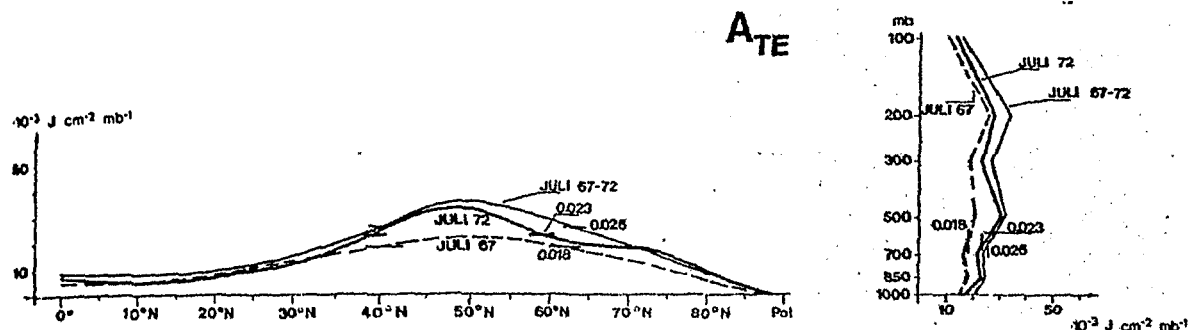


Abb. 9

Zonale Mittel und Vertikalprofile der durch die wandernden Wellen hervorgerufenen verfügbaren potentiellen Energie für den Juli 1967, Juli 1972 und den Juli 1967 bis 1972. Sonst wie Abb. 2.

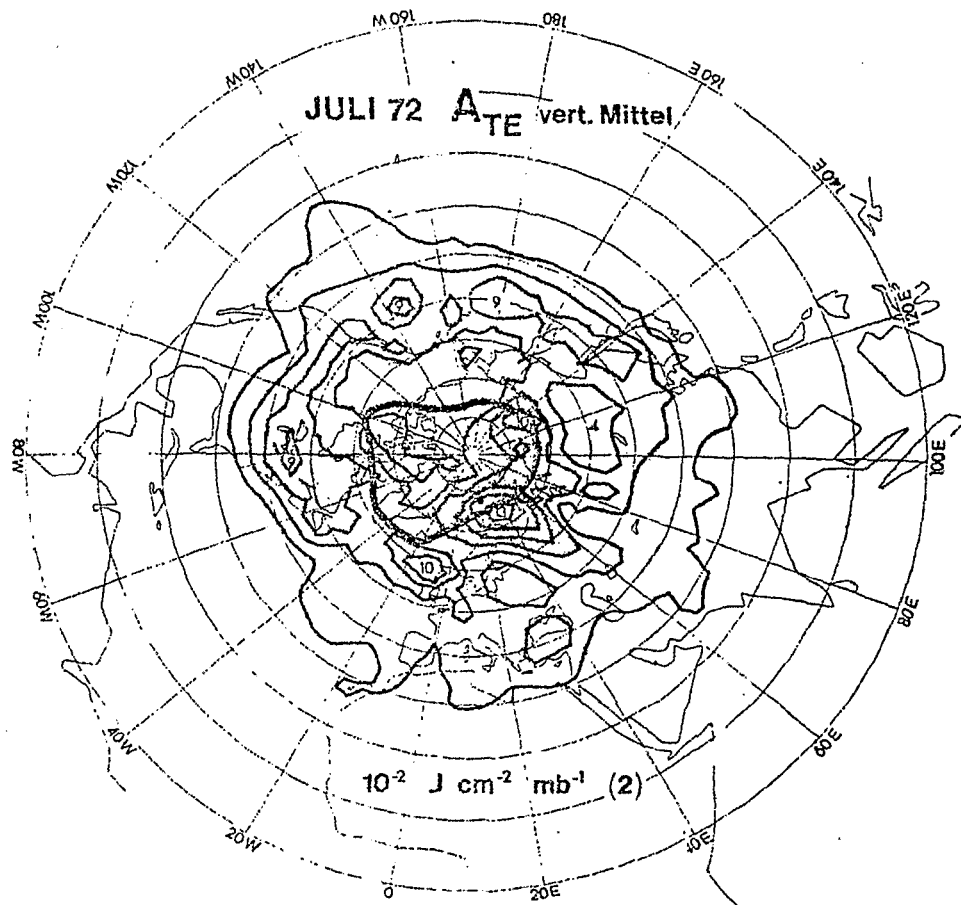


ABB. 10

Vertikales Mittel der turbulenten verfügbaren potentiellen Energie der wandernden Wellen im Juli 1972. Gebiete mit >0.06 Einheiten sind hell schraffiert. Sonst wie Abb. 5.

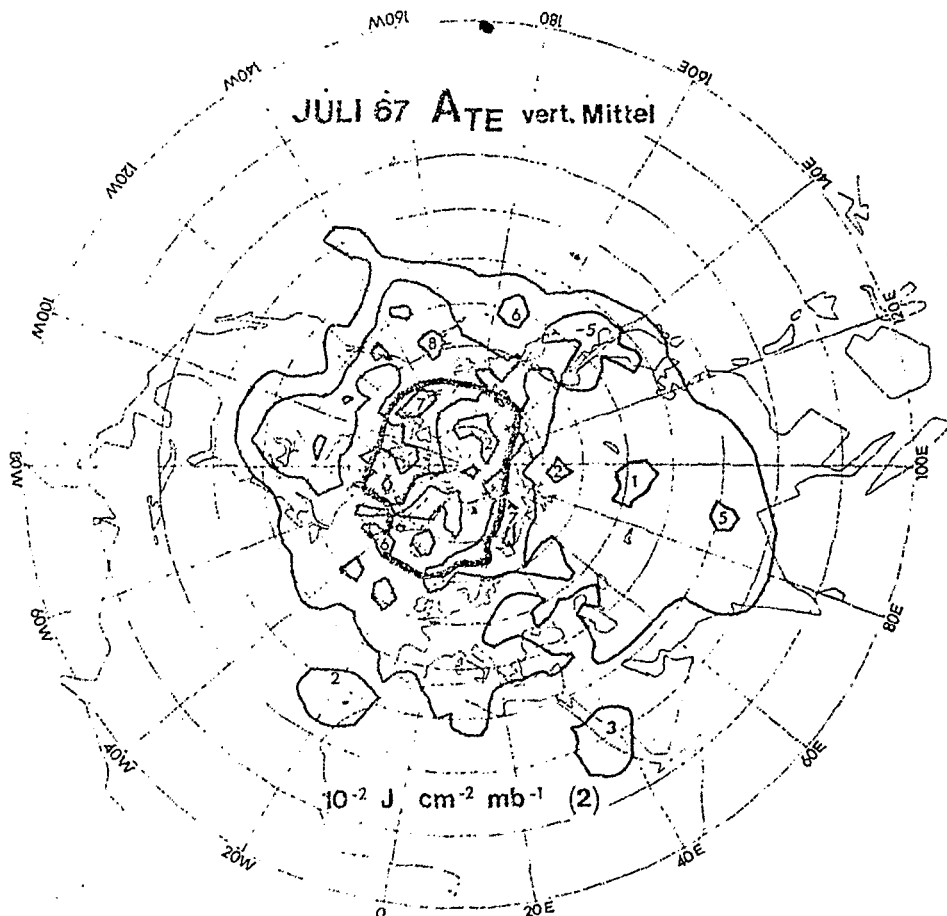


ABB. 11

Vertikales Mittel der turbulenten verfügbaren potentiellen Energie der wandernden Wellen im Juli 1967. Sonst wie Abb. 10.

Nordpazifik bis nach Neufundland. Weiterhin zeigen sich Extremwerte über den Britischen Inseln und dem Nordpolarmeer. Die mit $0,13 \text{ J cm}^{-2} \text{ mb}^{-1}$ über der Barents-See als Maximum beobachtete verfügbare potentielle Energie ist dabei um die Hälfte kleiner als das Maximum im Januar 1971 (Abb. 5). Die größten Werte liegen im Juli 1972 südlich der mittleren Lage der Polarfront. Dies kann folgenderweise gedeutet werden. Im Unterschied zum Januar erfolgen im Juli zwar weniger und schwächere Kaltluftvorstöße, die aber in Form von abgeschnürten Kaltlufttropfen weit nach Süden vorstoßen, wodurch die Maxima von A_{TE} südlich der mittleren Lage der Polarfront verursacht werden. Im Januar erfolgen länger andauernde

+)

Dies läßt sich wie folgt zeigen. Bezeichnet man die Zeit eines einzigen Monats, über den gemittelt werden soll, mit t_n , für $n = 1 \dots 6$, und die Mittelungszeit für alle sechs Monate mit t , so muß gelten:

$$T = [T]_{(t_n)} + (T)_{(t_n)} \text{ und } T = [T]_{(t)} + (T)_{(t)} \quad (A)$$

Daraus folgt

$$(T)_{(t)} = (T)_{(t_n)} + \{ [T]_{(t_n)} - [T]_{(t)} \}$$

und

$$(T)_{(t)}^2 = (T)_{(t_n)}^2 + \{ [T]_{(t_n)} - [T]_{(t)} \}^2 + 2(T)_{(t_n)} \{ [T]_{(t_n)} - [T]_{(t)} \} \quad (C)$$

Da die Einzelmonate jeweils über die gleiche Anzahl von Tagen gemittelt wurden, gilt z.B.:

$$[T]_{(t)} = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^6 [T]_{(t_n)} \quad (D)$$

und man erhält aus (C):

$$[(T)_{(t)}^2]_{(t)} = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^6 [(T)_{(t_n)}^2]_{(t_n)} + \frac{1}{n} \sum_{n=1}^6 \{ [T]_{(t_n)} - [T]_{(t)} \}^2, \quad (E)$$

da der letzte Term aus (C) bei Mittelung über die Zeit t_n entfällt. Weil jedoch normalerweise $[T]_{(t_n)}$ nie genau gleich $[T]_{(t)}$

sein wird, ergibt sich unter Berücksichtigung des Faktors γ nach Formel (7), daß die aus insgesamt sechs Monaten berechnete verfügbare potentielle Energie der wandernden Wellen mit Hilfe Beziehung (E) größer als das arithmetische Mittel aus den für jeden Monat separat berechneten Werten für A_{TE} ist.

Kaltluftausbrüche dagegen im Bereich der mittleren Lage der großen Tröge, wodurch die größten Werte A_{TE} dann nördlich der mittleren Lage der Polarfront auftreten. Im Juli 1967 (Abb. 11) zeigen sich zwar relative Maxima auch in der Umgebung von $50^{\circ}N$; diese sind jedoch nur schwach ausgeprägt und im allgemeinen $< 0,06 \text{ J cm}^{-2} \text{ mb}^{-1}$.

Zur Erklärung der Horizontalverteilungen der Abb. 10 und 11 werden für den Juli 1972 die synoptische Beschreibung von R.E. TAUBENSEE (1972) und für den Juli 1967 die entsprechende von R.R. DICKSON (1967) herangezogen. Man erkennt aus den in Abb. 12 dargestellten Breitenkreismitteln des zonalen Index, daß im Juli 1972 ein relativ geringer mittlerer zonaler Index von $9,1 \text{ m sec}^{-1}$ mit großen Schwankungen innerhalb des ganzen Monats aufgetreten war, während der Juli 1967 einen hohen zonalen Index von $9,1 \text{ m sec}^{-1}$ mit geringen Schwankungen aufweist. Die Abb. 12 oben deutet bereits darauf hin, daß im Juli 1972 starke Wellenbildungen erfolgten, die für die hohen Werte von A_{TE} sorgten. Aus einer Mittelkarte der Temperatur für diesen Monat erkennt man, daß dabei ausgeprägte Kaltluftvorstöße über dem westlichen Nordatlantik bis zu den Britischen Inseln, über dem Polarmeer und bei den Aleuten erfolgten (vgl. Abb. 12 aus P. SPETH, 1974d), wo dann auch in Abb. 10 die Maxima auftreten. Dies sieht man ebenso aus den oberen drei Diagrammen der Abb. 1 in denen für diesen Bereich ein über jeweils mehrere Längengrade gemittelter zonaler Index aufgetragen ist. Der Juli 1967 zeichnet sich dagegen durch eine Fortpflanzung von nur langen Wellen mit geringer Amplitude in mittleren und hohen Breiten aus (vgl. dazu die entsprechende Mittelkarte, Abb. 7 aus P. SPETH, 1974d). Dies wird deutlich aus den drei unteren Diagrammen der Abb. 13, in

ZI (BREITENKREISMITTEL)

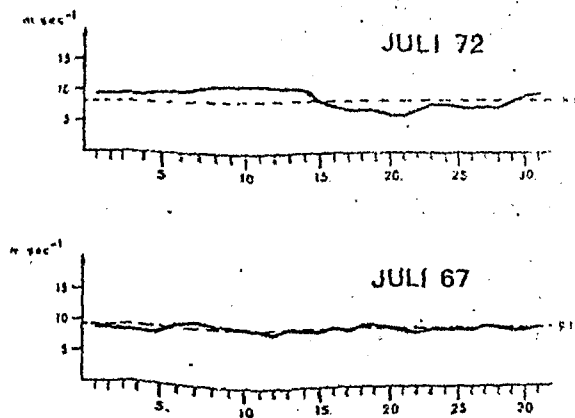


Abb. 12
Das Breitenkreismittel des zonalen Index für den Juli 1972 und Juli 1967. Sonst wie Abb. 7.

ZI

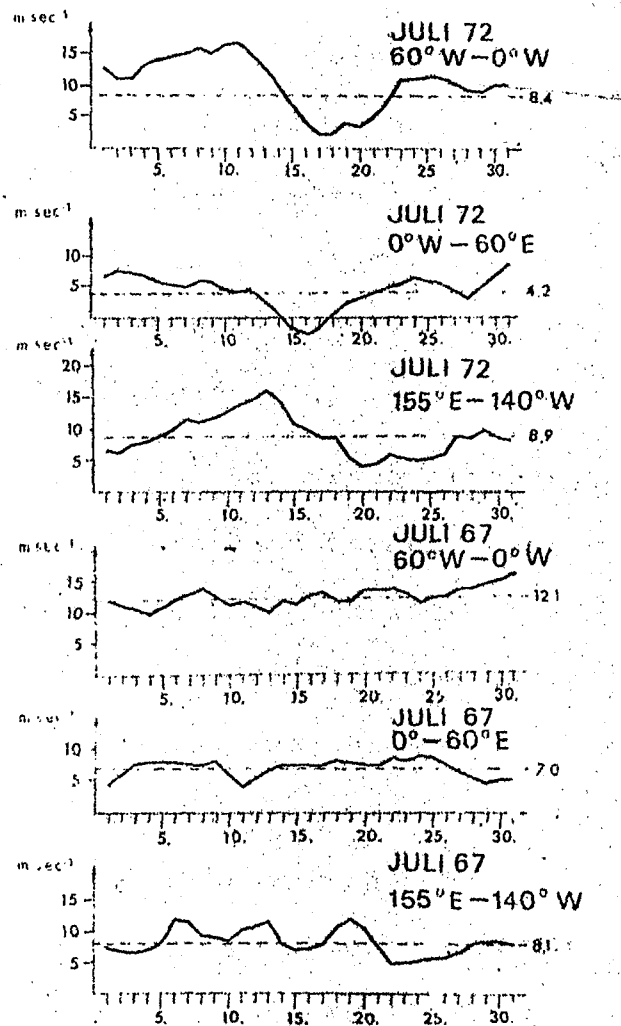


Abb. 13
Der zonale Index als Mittel über mehrere Längengradintervalle für den Juli 1972 und Juli 1967. Sonst wie Abb. 7.

denen für dieselben Bereiche wie für den Juli 1972 die zonalen Indices abgetragen sind, die demzufolge nur eine geringe Veränderlichkeit in Bezug auf die Zeit aufweisen. Eine besondere Rolle spielen dabei - besonders über Asien - Wettersituationen mit blockierenden Höhenrücken, die einen Luftmassenaustausch verhindern. Ähnlich wie bei den beiden betrachteten Wintermonaten werden auch im Juli dann hohe Werte von A_{TE} hervorgerufen, wenn der zonale Index relativ klein ist, wobei noch blockierende Hochdruckwetterlagen eine besondere Rolle spielen.

Wie schon bei der Diskussion für die beiden Januar-Monate herausgestellt wurde, könnten die zonalen Indices dazu herangezogen werden, Ergebnisse von Modellrechnungen in Hinblick auf die durch die wandernden Wellen hervorgerufene verfügbare potentielle Energie zu überprüfen. Für eine solche - in gewissem Sinne als Parametrisierung zu bezeichnende - Überprüfung bieten sich außerdem noch zur Charakterisierung der nordhemisphärischen Zirkulation die Koeffizienten der natürlichen Orthogonalfunktionen des Geopotentials in 500 mb an. Durch diese von H. FECHNER (1973) gegebene Möglichkeit kann der Zirkulationstyp des betreffenden Monats durch wenige Zahlen gut beschrieben werden. Diese Methode soll in Zukunft noch herangezogen werden, um neben der verfügbaren potentiellen Energie vor allem auch die in den Abschnitten 3 und 4 gezeigten großskaligen horizontalen Flüsse von Energie und Impuls zu kennzeichnen.

2.2. DIE VERFUEGBARE POTENTIELLE ENERGIE DER STEHENDEN WELLEN

Zur Berechnung der durch die stehenden Wellen hervorgerufenen verfügbarer potentiellen Energie nach Beziehung (4) wurde das für jeden einzelnen Januar und Juli zeitlich gemittelte Tempe-

raturfeld mit Hilfe der von K. APPE (1971) entwickelte Methode der Analyse meteorologischer Felder durch Kugelflächenfunktionen herangezogen; es erfolgte dabei eine Auflösung bis zur 15. Ordnung. Aus den auf diese Weise berechneten Kugelflächenfunktionskoeffizienten wurden für jeden Breitenkreis die Fourier-Koeffizienten bis zur 14. Ordnung ermittelt. Man erhält dann folgende Reihe für die zeitlichen Temperaturmittel:

$$[T](t) = [T](t) + \sum_{n=1}^{14} \{a_n \cos n\lambda + b_n \sin n\lambda\}. \quad (9)$$

Auf Grund der Orthogonalität der Sinusfunktion ergibt sich daraus für das zonale Mittel des Beitrages einer stehenden Welle mit der Wellenzahl i zur turbulenten verfügbaren potentiellen Energi

$$A_{MSE,i} = \frac{1}{2g} \int \gamma \{a_i^2 + b_i^2\} dp. \quad (10)$$

In Abb. 14 sind die zonalen Mittelwerte der turbulenten verfügbaren potentiellen Energie der stehenden Wellen in verschiedenen Wellenlängenintervallen jeweils für den Januar und Juli des Gesamtzeitraumes 1967 bis 1972 dargestellt. Man entnimmt dieser Abbildung, daß die verfügbare potentielle Energie der stehenden Wellen als Summe über alle Wellenlängen $A_{MSE,1-15}$ im Januar ein Maximum in $50^\circ N$ besitzt, das sich zum Juli hin auf $30^\circ N$ verschiebt. Diese besonders zum Unterschied von A_{TE} erfolgende Südwärtsverlagerung im Juli ist darin begründet, daß in diesem Monat das Temperaturfeld in mittleren und südlichen Breiten weitgehend zonal eingestellt ist. Dagegen findet man in $30^\circ N$ über den großen Landmassen ausgehend von Westafrika über Asien bis zur Pazifikküste wesentlich wärmere Temperaturen als über dem Atlantik, Mittelamerika und dem Pazifik. Diese durch unterschiedliche Erwärmung auf einem Breitenkreis hervorgerufenen Temperaturgegensätze bringen dann auch das Maximum bei $A_{MSE,1-15}$

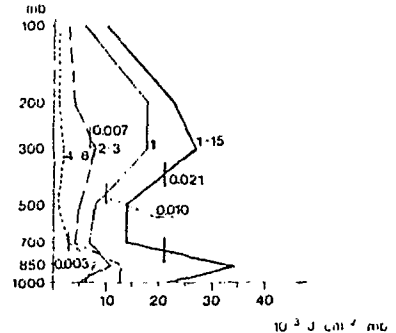
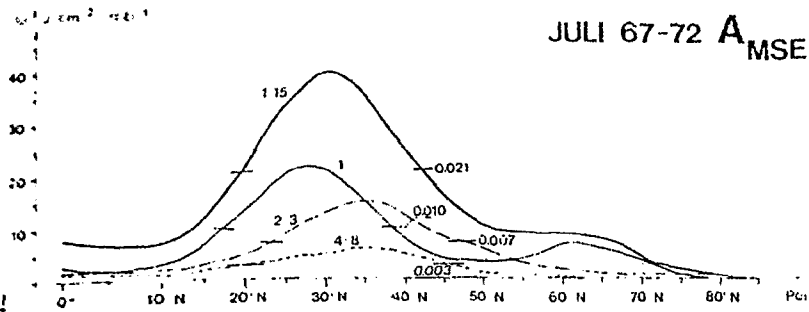
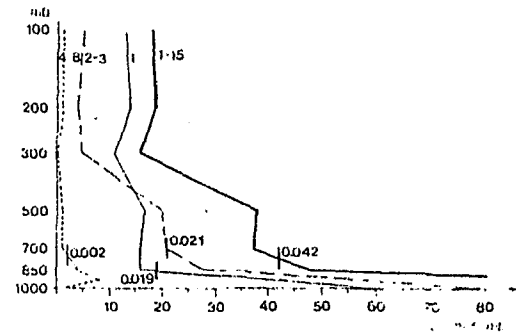
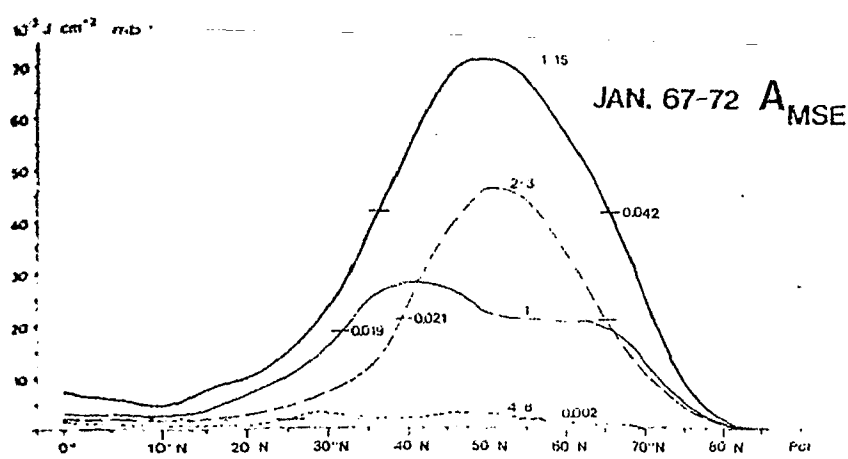


Abb. 14

Horizontale Mittel und Vertikalprofile der durch die stehenden Wellen verschiedener Wellenlängen hervorgerufenen verfügbaren potentiellen Energie für den Januar und Juli aus dem Gesamtzeitraum 1967 bis 1972. Sonst wie Abb. 2.

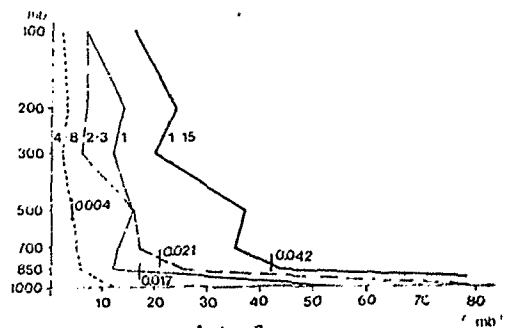
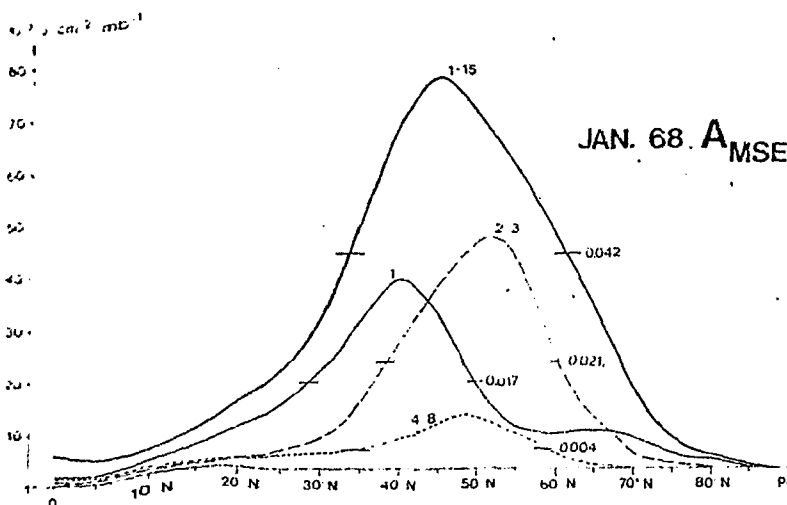
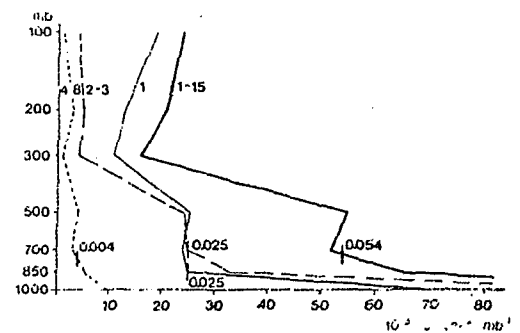
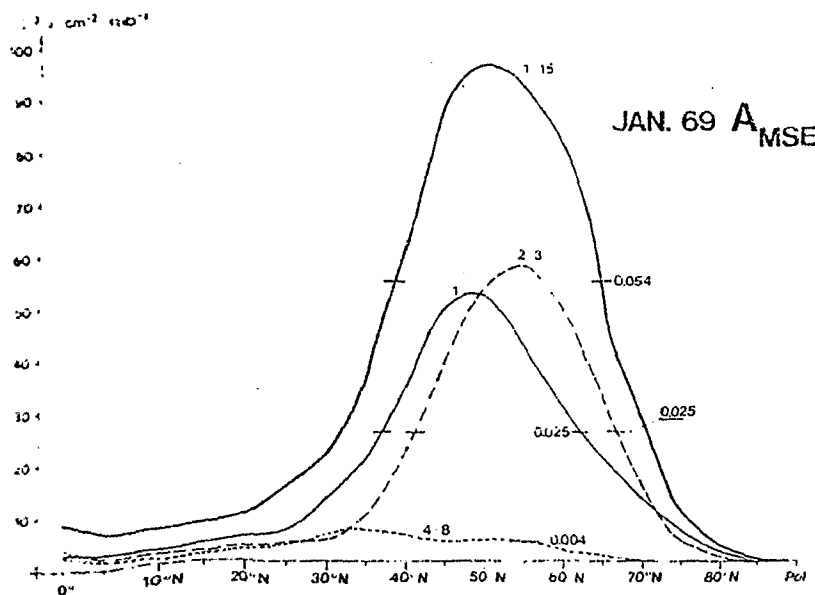


Abb. 15

Horizontale Mittel und Vertikalprofile der durch die stehenden Wellen verschiedener Wellenlängen hervorgerufenen verfügbaren potentiellen Energie für den Januar 1968 und Januar 1969. Sonst wie Abb. 2.

in Abb. 14 unten hervor; demzufolge steuert im Juli in diesen Breiten dann auch die Wellenzahl 1 den größten Beitrag zur verfügbaren potentiellen Energie bei, was dann ebenfalls auf das Flächenmittel zutrifft. Das dazugehörige Vertikalprofil in Abb. 14 unten rechts zeigt, daß die größten Werte der Wellenzahl 1 in der unteren und oberen Troposphäre erreicht werden, wobei lediglich in der unteren Troposphäre die Wellenzahl 1 von den Wellenzahlen 2 bis 3 übertroffen wird; aus den dazugehörigen zonalen Mittelwerten erkennt man, daß dies in den in der Umgebung von 35°N im Zusammenhang mit der Land-Meer-Verteilung der Nordhalbkugel sich ausbildenden langen atmosphärischen Wellen seine Ursache hat. Ebenfalls in diesen Breiten sind zu dieser Jahreszeit die durch die unregelmäßige Orographie bedingten Beiträge der Wellenzahlen 4 bis 8 gegenüber dem Januar relativ groß.

Im Januar ist die durch die stehenden Wellen hervorgerufene verfügbare potentielle Energie in der untersten Troposphäre am größten; dies kommt dadurch zustande, daß sich in Erdbodennähe die durch die Orographie und die verschiedene Bedeckung mit Land und Meer hervorgerufenen zonalen Temperaturunterschiede deutlich bemerkbar machen; diese Gegensätze der Bedingungen über den Weltmeeren und den Kontinenten sind im Winter wesentlich größer als im Sommer. Im Januar bewirken die großen Tröge über Nordamerika, Europa und Asien, daß die Wellenzahlen 2 bis 3 im Unterschied zum Januar den größten Anteil an der verfügbaren potentiellen Energie der stehenden Wellen haben, was vor allem in mittleren Breiten zum Ausdruck kommt. Die Wellenzahl 1 besitzt die größten Werte dagegen weiter südlich bei 40°N . Die Beiträge der Wellenzahlen 4 bis 8 sind im Januar vernachlässigbar klein.

Wie bei der durch die wandernden Wellen hervorgerufenen verfügbaren potentiellen Energie sollen nun auch für die stehenden Wellen die Extremwerte aus den sechs verschiedenen Januar- bzw. Juli-Monaten besonders untersucht werden. Im Unterschied zu A_{TE} muß dabei jedoch berücksichtigt werden, daß die in Abb. 14 gezeigten vertikalen Flächenmittel für A_{MSE} des sechsjährigen Zeitraumes von 0,042 bzw. 0,021 $J\ cm^{-2}\ mb^{-1}$ nun kleiner als das arithmetische Mittel aus den für die einzelnen Monate getrennt berechneten Werten für A_{MSE} ist. Dies liegt daran, daß nach Formel (4) die verfügbare potentielle Energie der stehenden Wellen aus den Abweichungen der zeitlichen Mittel an den verschiedenen Gitterpunkten von den dazugehörigen zonalen Mitteln berechnet wird; da aber bei Mittelung über eine längere Zeit ein glattes Temperaturfeld entsteht, wird der für A_{MSE} aus einem sechsjährigen Januar-Mittel berechnete Wert eben kleiner als das arithmetische Mittel aus den für die einzelnen Monaten berechneten Werten sein.

Man könnte vermuten, daß zwischen den Extremwerten der durch die wandernden und der durch die stehenden Wellen hervorgerufenen verfügbaren potentiellen Energie ein enger Zusammenhang besteht. Es könnte zum Beispiel erwartet werden, daß A_{MSE} dann groß ist, wenn A_{TE} ein Maximum aufweist. Dies könnte mit der Begründung geschehen, daß im vergangenen Abschnitt davon die Rede war, daß A_{TE} dann groß war, wenn starke Wellenbildungen auftraten, und somit im zeitlichen Mittel das Temperaturfeld ebenfalls große Verschleifungen aufweisen könnte. Betrachtet man jedoch die Berechnungsweise von A_{TE} und A_{MSE} , so stellt man fest, daß hohe Werte von A_{TE} dann zustande kommen, wenn an einem festen Ort möglichst häufig starke Temperaturschwankungen auftreten. Dies wird

in der Atmosphäre eben durch sich bildende Wellen, die schnell in zonaler Richtung fortschreiten können, hervorgerufen. Findet man aber zum Beispiel über einem Gebiet der Erde während eines ganzen Monats einen quasistationären Höhenrücken, so sind die lokalen Temperaturänderungen - und damit A_{TE} - dort nur klein; für das zeitliche Temperaturmittel dieses Bereichs ergeben sich jedoch große Abweichungen vom dazugehörigen zonalen Mittel - und damit hohe Werte für A_{MSE} . Aus diesem Grund weisen die vertikalen Flächenmittel für A_{MSE} und A_{TE} keine Korrelation auf. Der niedrigste durch die stehenden Wellen hervorgerufene Wert der verfügbaren potentiellen Energie wird im Januar 1968 und der höchste im Januar 1969 erreicht.

Man entnimmt der Abb. 15, daß die Veränderlichkeit der durch die stehenden Wellen bedingten verfügbaren potentiellen Energie zwischen dem Januar 1968 und dem Januar 1969 vor allem durch die Wellenzahl 1 hervorgerufen wird. Man findet, daß im Januar 1969 A_{MSE} ein ausgeprägtes Maximum bei $50^{\circ}N$ aufweist, gegenüber $40^{\circ}N$ im Januar 1968; wie man aus den in Abb. 16 und 17 wiedergegebenen Horizontalverteilungen entnimmt, rührt dies daher, daß die durch den mittelatlantischen Hochdruckrücken verursachte verfügbare potentielle Energie im Januar 1969 nach Osten verschoben ist und näher an die mit dem asiatischen Trog verknüpfte verfügbare potentielle Energie herangerückt ist, die zusätzlich in diesem Monat besonders ausgeprägt ist. Durch eine langanhaltende Blockierung über den Aleuten werden dort im Januar 1969 ebenfalls noch hohe Werte von A_{MSE} erzeugt. Man entnimmt der Abb. 16 und 17 weiterhin, daß während der Januar-Monate die Polarfront eine Grenze zwischen großen durch die stehenden Wellen hervorgerufenen Vorräten an verfügbarer potentieller Energie darstellt; besonders große Werte werden südlich davon im atlantischen

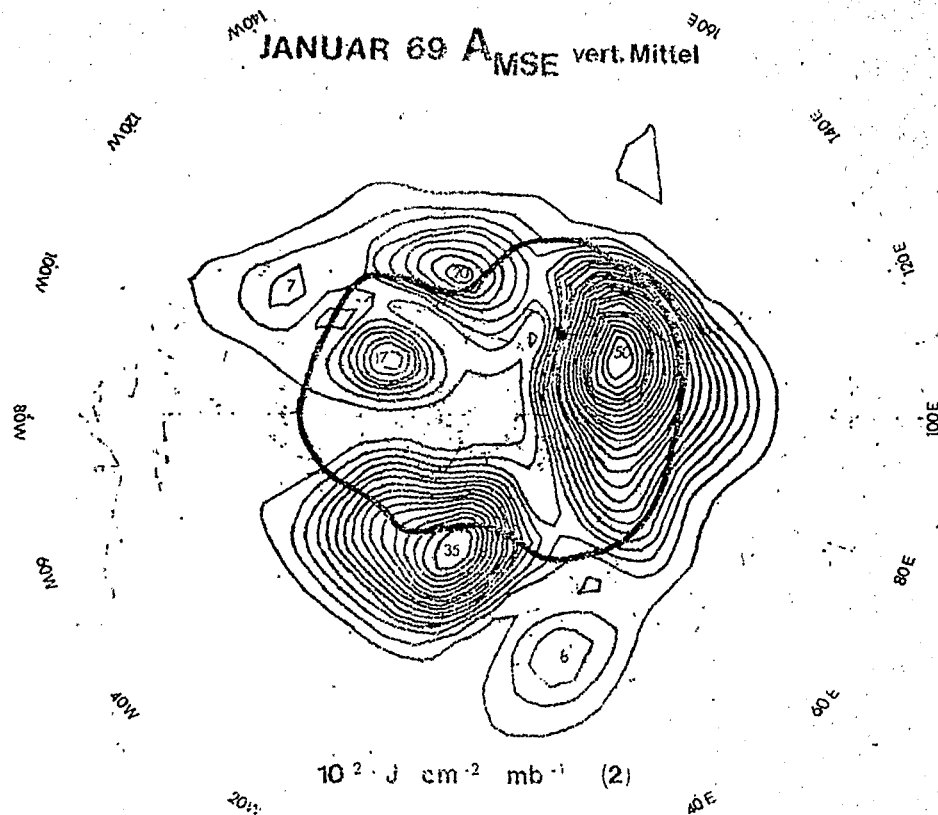


Abb. 16

Vertikales Mittel der turbulenten verfügbaren potentiellen Energie der stehenden Wellen im Januar 1969. Die mittlere Lage der Polarfront in 500 mb ist durch die dick ausgezogene Linie gekennzeichnet. Der Isolinienabstand ist hinter der Dimensionsangabe in Flammern gesetzt.

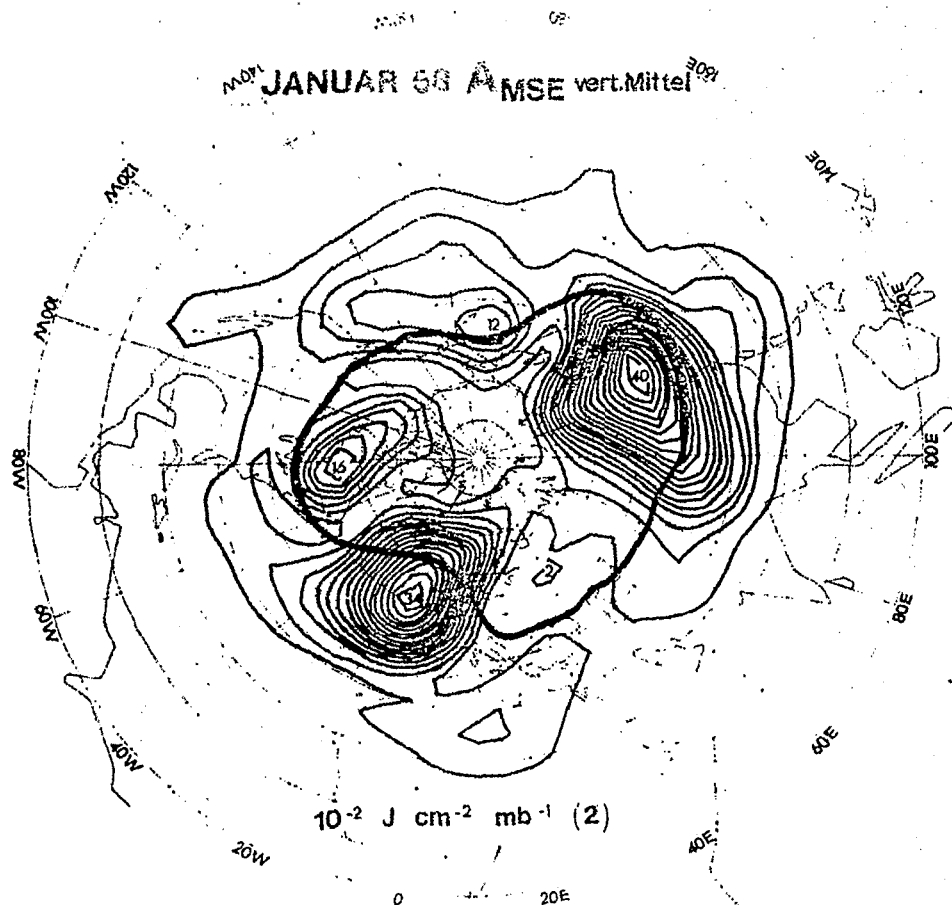


Abb. 17

Vertikales Mittel der turbulenten verfügbaren potentiellen Energie der stehenden Wellen im Januar 1968. Sonst wie Abb. 16.

Warmluftrücken mit $0,035$ ($0,034$) $J\ cm^{-2}\ mb^{-1}$ und nördlich davon im asiatischen Kaltlufttrog mit $0,050$ ($0,040$) $J\ cm^{-2}\ mb^{-1}$ erreicht. Über dem Pazifik und Nordamerika sind die Werte dagegen wesentlich geringer. Während im vertikalen Flächenmittel des gesamten sechsjährigen Zeitraumes im Januar A_{TE} mit $0,054\ J\ cm^{-2}\ mb^{-1}$ größer als A_{MSE} mit $0,042\ J\ cm^{-2}\ mb^{-1}$ ist, erkennt man durch Vergleich der Abb. 16 und 17 mit den Abb. 5 und 6, daß die Spitzenbeträge der Maxima von A_{MSE} doppelt so groß wie diejenigen von A_{TE} sind. Vor allem findet man, daß im asiatischen Kaltlufttrog der Anteil der stehenden Wellen bei weitem denjenigen der wandernden Wellen übertrifft und über Nordamerika das Umgekehrte der Fall ist, was auch eine nähere Inspektion der hier nicht wiedergegebenen Horizontalverteilungen aller Januar-Monate ergibt, vgl.

P. SPETH (1974d). Dies ist eine anschauliche Beschreibung für die Tatsache, daß über Amerika im Januar häufig Kaltluftzungen vorstoßen, während über Asien diese quasistationär sind. Die einzelnen Vertikalprofile sind ähnlich wie im gesamten sechsjährigen Mittel.

Bei den zur Verfügung stehenden Sommermonaten erweist sich der Juli 1967 als ein Minimum und der Juli 1972 als ein Maximum bezüglich A_{MSE} . Man entnimmt der Abb. 18, daß die zonalen Mittelwerte und die Vertikalprofile des Juli 1967 fast identisch sind mit denjenigen des sechsjährigen Mittelungszeitraumes (vgl. Abb. 14 unten). Aus der in Abb. 20 für den Juli 1967 dargestellten Horizontalverteilung sieht man anschaulich, daß die Verhältnisse im Juli gänzlich unterschiedlich zu denjenigen im Januar sind und die Polarfront keine Grenzfläche mehr zwischen den Extremwerten von A_{MSE} in horizontaler Richtung darstellt. Während in mittleren Breiten die stehenden Wellen nur geringe Anteile an verfügbarer potentieller Energie besitzen, sind diese Wellen

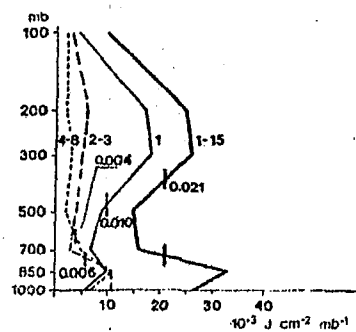
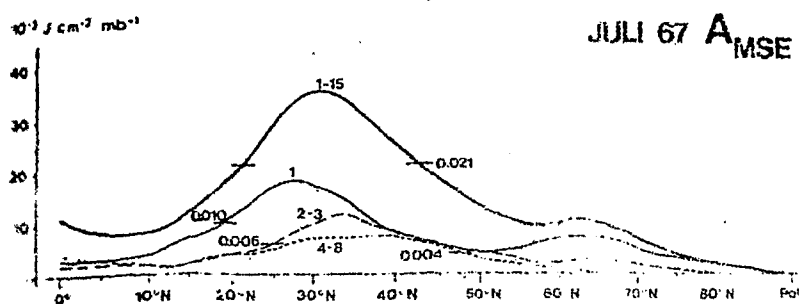
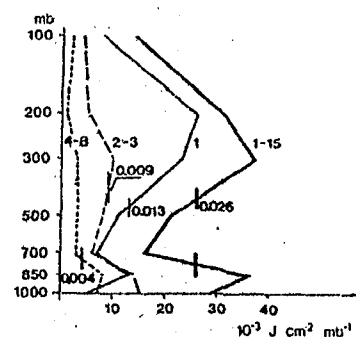
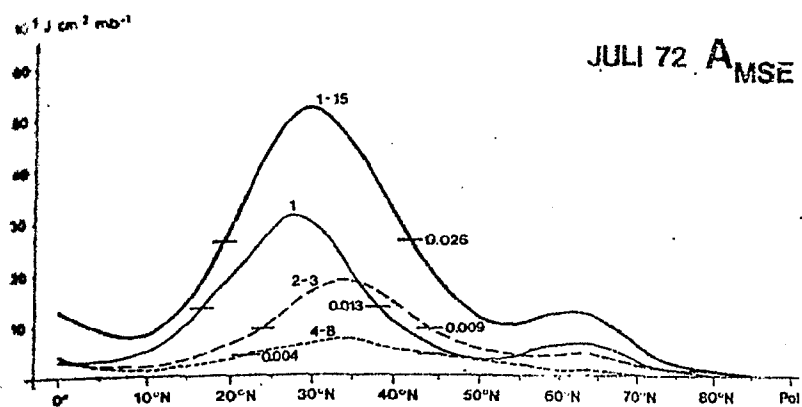


Abb. 18

Zonale Mittel und Vertikalprofile der durch die stehenden Wellen verschiedener Wellengruppen hervorgerufenen verfügbaren potentiellen Energie für den Juli 1972 und Juli 1967. Sonst wie Abb. 2

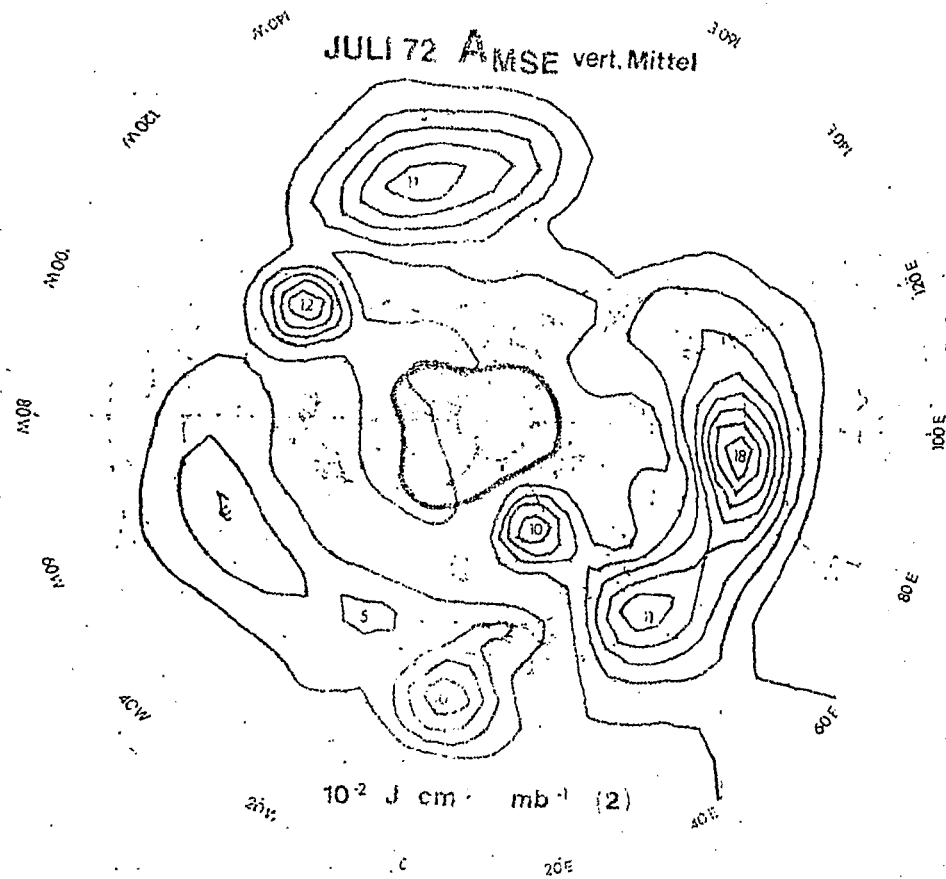


Abb. 19

Vertikales Mittel der turbulenten verfügbaren potentiellen Energie der stehenden Wellen im Juli 1972. Sonst wie Abb. 16.

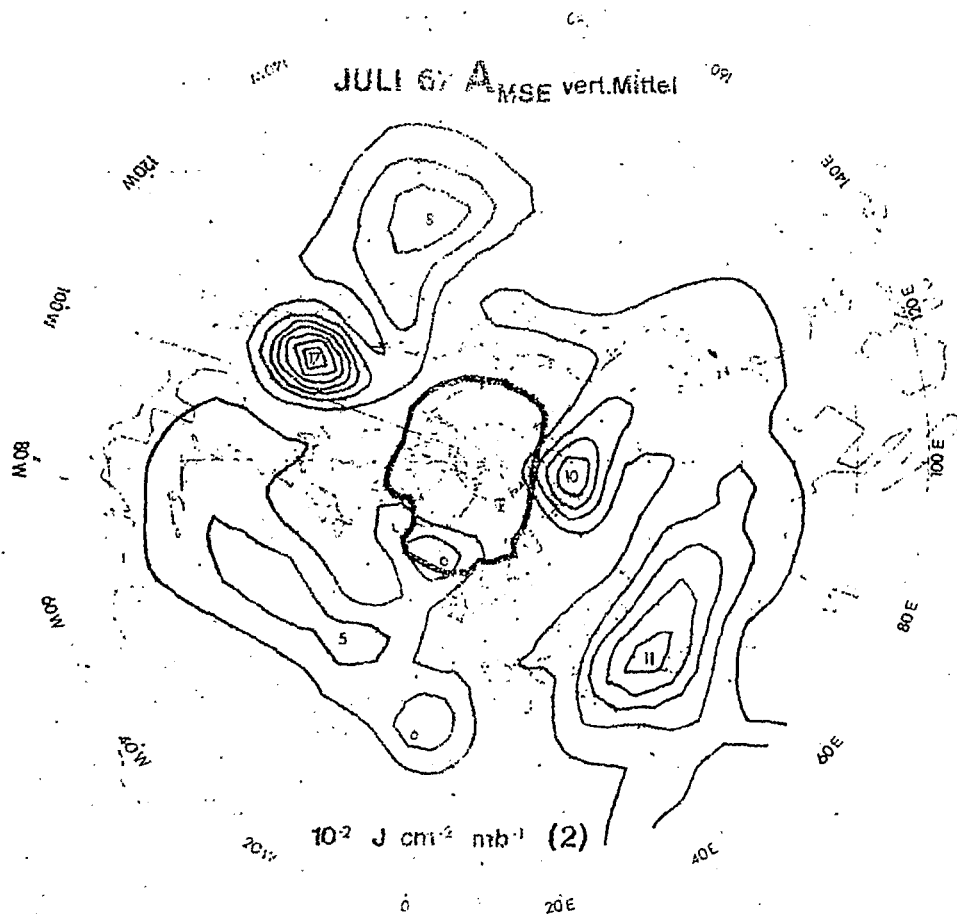


Abb. 20

Vertikales Mittel der turbulenten verfügbaren potentiellen Energie der stehenden Wellen im Juli 1967. Sonst wie Abb. 16.

etwa in der Umgebung von 30°N am energiereichsten. Man erkennt aus Abb. 20 deutlich, daß im Juli die größten Werte dabei in der Warmluft über der Persischen Golf und den amerikanischen Südweststaaten erreicht werden (sommerliche Hitzetiefdruckzentre). Durch die im Sommer kältere Luft über dem Pazifik und dem Atlantik in diesen Breiten werden dagegen wesentlich geringere Beträge an A_{MSE} hervorgerufen. Während das im Januar 1969 gegenüber dem Januar 1968 durch die stehenden Wellen hervorgerufene Maximum der verfügbaren potentiellen Energie hauptsächlich auf das Anwachsen des Beitrages der Wellenzahl 1 zurückzuführen war, sieht man aus Abb. 18 oben, daß im Juli 1972 gegenüber dem Juli 1967 sowohl die Wellenzahl 1 als auch die Wellenzahlen 2 bis 3 im gleichen Maße eine Rolle spielen. Man folgert aus der Abb. 19, daß dies vor allem durch ein Anwachsen der durch die asiatische sommerliche Warmluft hervorgerufenen verfügbaren potentiellen Energie und in geringerem Maße auch auf dem Anstieg der durch die Kaltluft über dem Atlantik und Pazifik bedingten Beiträge beruht.

Die zonale verfügbare potentielle Energie nach Formel (3) wird an dieser Stelle für die einzelnen Monate nicht gesondert untersucht, da hierbei keine markanten Unterschiede auftreten.

In diesem Abschnitt 2 wurde hauptsächlich durch flächenhafte Feldverteilungen gezeigt, zwischen welchen Grenzen die verfügbare potentielle Energie der wandernden und stehenden Wellen schwanken kann. Die damit in Zusammenhang stehenden veränderlichen Energieumsetzungen und -umwandlungen, auf die am Anfang dieses Abschnittes kurz eingegangen worden ist, sollen in einer weiteren Studie einer eingehenden Untersuchung unterzogen werden; dies wird jedoch davon abhängen, ob die dafür in hohem Umfang benötigt maschinelle Rechenzeit zur Verfügung gestellt werden kann.

3. HORIZONTALE FLUESSE VON SENSIBLER UND LATENTER ENERGIE

Ein Aspekt der Allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre, der in den letzten Jahren verstärkte Beachtung gefunden hat, ist derjenige Mechanismus, durch welchen horizontale Energietransporte in meridionaler Richtung erfolgen. Im System Ozean-Atmosphäre muß insgesamt, d.h. im räumlichen und zeitlichen Mittel, ein zu den Polen hin gerichteter Transport erfolgen, da für die niederen Breiten ein Überschuß der einfallenden gegenüber der ausgehenden Strahlung existiert und höhere Breiten ein Strahlungsdefizit aufweisen; dies ist erforderlich, weil Atmosphäre und Ozean sich über längere Zeit hinweg in einem angenähert stationären Gleichgewichtszustand befinden. Berechnungen dieser Transporte für das Gesamtsystem Ozean-Atmosphäre, die sich für jeden Breitenkreis als Konsequenz des Überschusses der absorbierten Sonneneinstrahlung gegenüber der ausgehenden langwelligen Strahlung nach W.D. SELLERS (1965) ergeben, zeigen für die Nordhalbkugel ein Maximum des nordwärts gerichteten Transportes in der Umgebung von 40°N , vgl. auch E.N. LORENZ (1967). T.H. VON DER HAAR and V.E. SUOMI (1971) haben dabei gezeigt, daß die Atmosphäre viermal so viel Energie nach Norden transportiert wie die Ozeane. Anfänglich durchgeführte Berechnungen auf der Grundlage der thermisch getriebenen Meridionalzirkulation von G. HADLEY (1735) oder auf Grund der Vorstellungen über die allgemeine Zirkulation von J. THOMSON (1892) oder von W. FERREL (1859) ergaben jedoch, daß dadurch nicht Energietransporte von einer solchen Größenordnung hervorgerufen werden, um ein Wärmegleichgewicht zu erreichen. In seiner wichtigen Arbeit über die Theorie der Turbulenz hat schon A. DEFANT (1921) darauf hingewiesen, daß die sich fortbewegenden Zyklonen der gemäßigten Breiten einen Hauptbetrag des

nach Norden gerichteten Transportes besorgen. Dies wurde in den letzten zwei Jahrzehnten durch eingehende vielfache Berechnungen bestätigt, welche auf routinemäßig an Radiosondenstationen der Nordhalbkugel durchgeführten aktuellen Messungen von Wind, Temperatur und Feuchte basieren. Mit der horizontalen Veränderlichkeit der Energieflüsse befaßt sich eine Studie von P. SPETH (1974b), wo auch auf andere in jüngerer Zeit auf diesem Gebiet durchgeführte Untersuchungen hingewiesen wird. Daraus kann man heute als gesichert ansehen, daß für den gesamten Energiehaushalt der Atmosphäre der Nordhalbkugel die zonalen Mittel der Flüsse von potentieller und kinetischer Energie vernachlässigbar klein sind; eine im Sinne von Beziehung (2) durchgeführte Aufteilung in die verschiedenen Anteile ergibt, daß lediglich in niederen Breiten die mittlere Meridionalzirkulation große Flüsse von potentieller Energie hervorruft. In mittleren Breiten sind dagegen die stehenden und vor allem die wandernden Wellen für die Transporte von sensibler und latenter Energie von großer Bedeutung. Die wandernden Wellen rufen dabei im Januar bei der latenten Energie einen maximalen Transport in der Umgebung von 30°N und bei der sensiblen Energie nördlich von 40°N hervor; im Juli wird der größte durch die fortschreitenden Wellen verursachte Fluß von latenter Energie dagegen bei 40°N und jener von sensibler Energie bei 50°N festgestellt.

Die Veränderlichkeit von Jahr zu Jahr dieser durch die wandernden Wellen hervorgerufenen Transporte, die noch weitgehend unerforscht ist, soll in diesem Kapitel näher untersucht werden. Die Monate mit den Extremwerten sind dabei dieselben, wie die bei der verfügbaren potentiellen Energie in Abschnitt 2 genannten, nämlich der Januar 1967, und der Januar 1971 bzw. der Juli 1967

und der Juli 1972. Die Ergebnisse wurden aus sämtlichen in den verschiedenen Monaten auf der Nordhalbkugel durchgeführten Radiosondenmessungen gewonnen. Die horizontale Analyse der einzelnen Vektorfelder erfolgte mit Hilfe der von H. FECHNER (1974) weiterentwickelten orthogonalen Vektorfunktionen, deren Anwendung bei P. SPETH (1974e) im Detail beschrieben ist. Diese Methode hat den Vorteil, daß keinerlei Annahmen zur Berechnung des Windfeldes gemacht werden, sondern daß lediglich empirisch gegebene Daten verwendet werden. Gezeigt werden in dieser Arbeit der meridionale durch die wandernden Wellen hervorgerufene Transport von sensibler Energie:

$$HvS_{TE} = \int c_p \left[(T)_{(t)} (v)_{(t)} \right]_{(t)} \frac{dp}{g} \quad (11)$$

und derjenige von latenter Energie

$$HvL_{TE} = \int L \left[(q)_{(t)} (v)_{(t)} \right]_{(t)} \frac{dp}{g} \quad (12)$$

mit den am Ende von Kapitel 1 genannten Symbolen.

Man erkennt deutlich aus den in Abb. 21 dargestellten Zonalschnitten entlang charakteristischen Breitenkreisen mit Maximaltransport, daß im gesamten sechsjährigen Zeitraum 1967 bis 1972 im Januar dabei nicht etwa ein gleichmäßig über alle Längengrade nach Norden gerichteter Transport erfolgt, sondern daß dieser hauptsächlich gewissermaßen in Kanälen vor sich geht, wobei stellenweise sogar ein südwärts gerichteter Transport auftritt. Im Juli sind die vorhandenen meridionalen Gegensätze dagegen weniger ausgeprägt.

3.1. HORIZONTALER FLUSS VON SENSIBLER ENERGIE

In den Abb. 22 und 23 sind die vertikalen Mittelwerte von HvS_{TE} für den Januar 1971 und Januar 1967 dargestellt. Zunächst einmal erkennt man aus diesen Abbildungen, daß der Fluß nicht

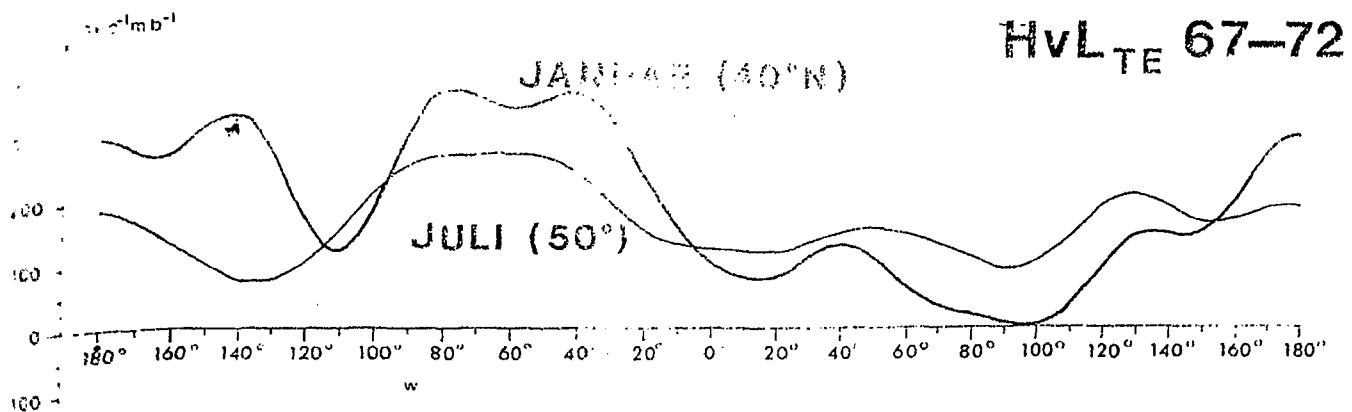
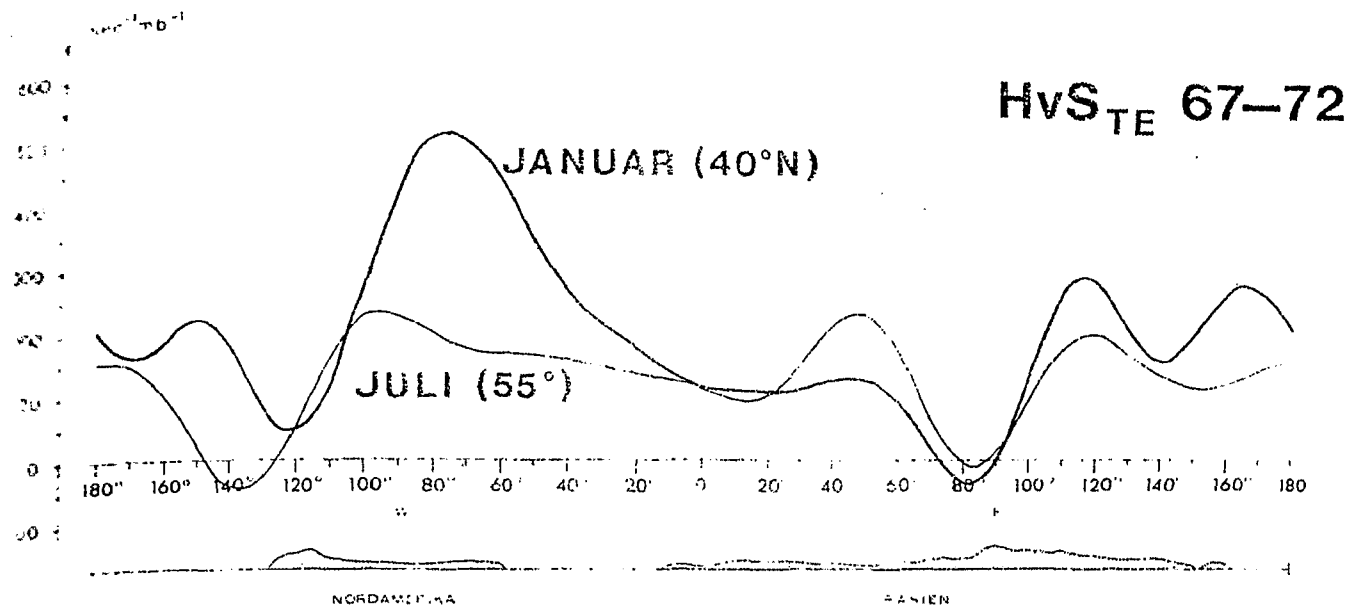


Abb. 21

Die Variabilität des durch die wandernden Wellen hervorgerufenen Flusses von sensibler Energie und von latenter Energie in Abhängigkeit von der geographischen Länge entlang von verschiedenen Breitenkreisen für den Januar und Juli des Gesamtzeitraumes 1967 bis 1972.

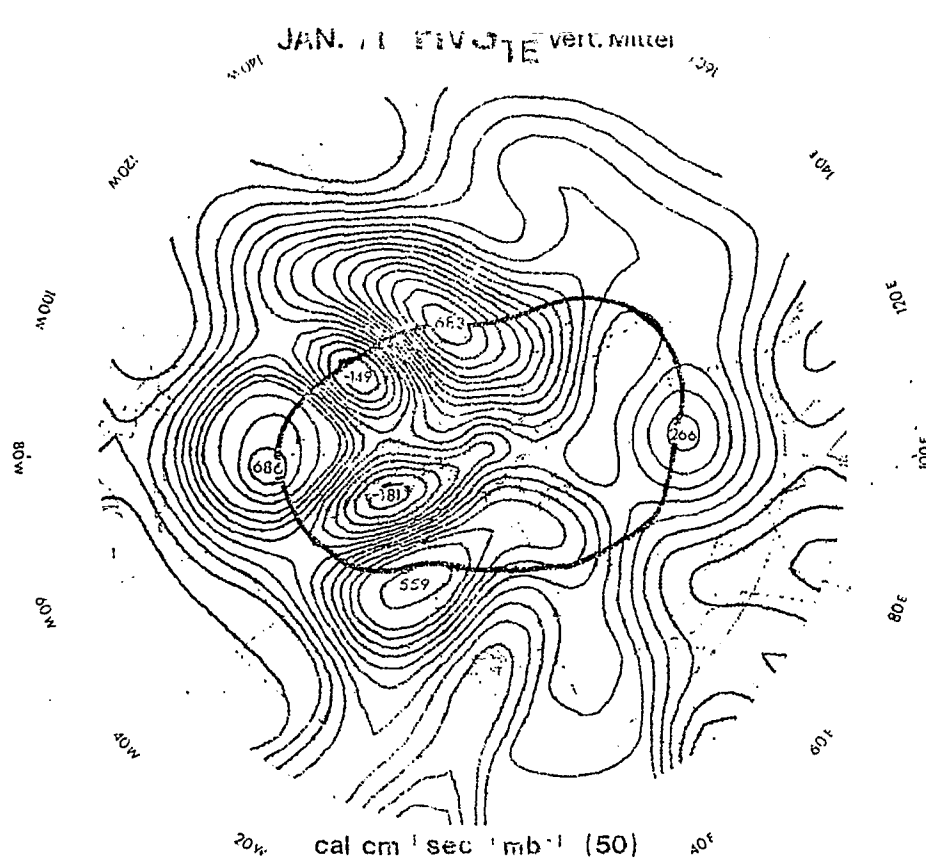


ABB. 22

Vertikales Mittel des durch die wandernden Wellen hervorgerufenen meridionalen Transportes an sensibler Energie für den Januar 1971. Der Isolinienabstand ist von der Angabe der Dimension in Kilowatt vermehrt. Ein nach Süden gerichteter Transport ist schraffiert. Die mittlere Lage der Polarfront ist durch die dick gezeichnete Linie gekennzeichnet.

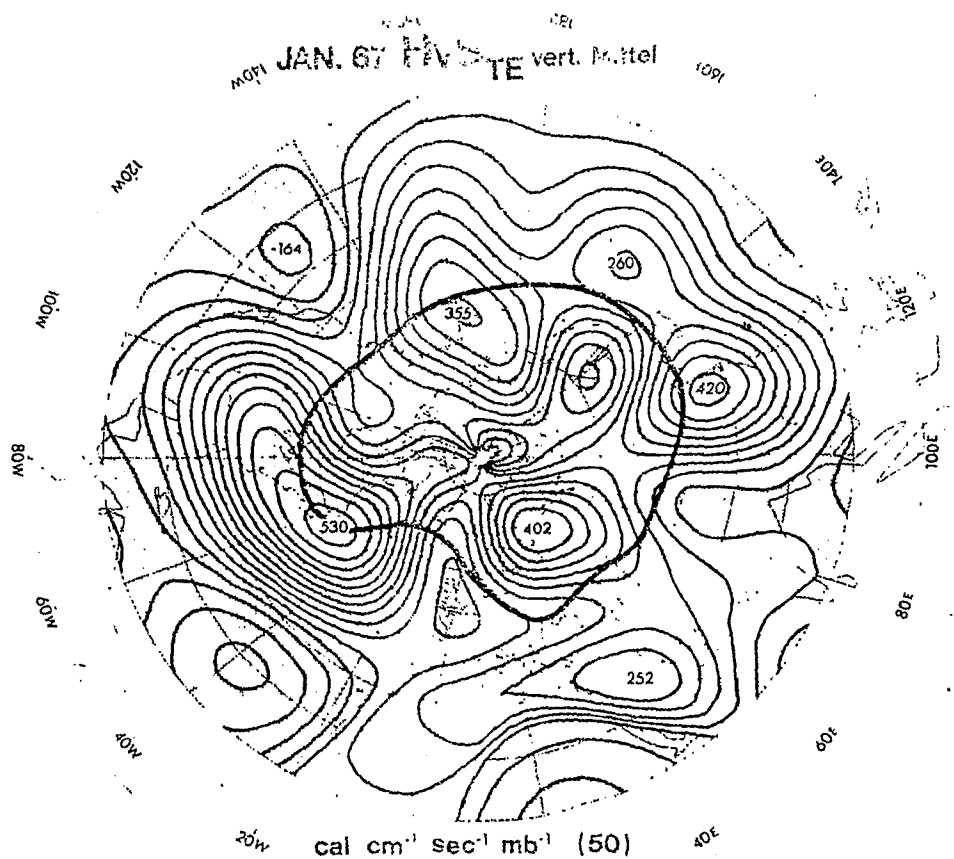


ABB. 23

Vertikales Mittel des durch die wandernden Wellen hervorgerufenen meridionalen Transportes an sensibler Energie für den Januar 1967. Sonst wie Abb. 22.

überall gleichmäßig nach Norden gerichtet ist, sondern daß über bestimmten Gebieten das Umgekehrte der Fall ist. Weiterhin fällt auf, daß über den niederen Breiten ein fast geschlossener Gürtel existiert, in dem ein geringer Transport nach Süden erfolgt. Dieser Transport entsteht aus einer negativen Korrelation zwischen $(T)_{\{t\}}$ und $(v)_{\{t\}}$, d.h. es wird oberhalb der Passatinversion relativ warme Luft $(T)_{\{t\}} > 0$ vom thermischen Äquator nach Süden mit $(v)_{\{t\}} < 0$ verfrachtet. In mittleren Breiten wird dagegen überwiegend sensible Energie nach Norden transportiert, was einer positiven Korrelation zwischen $(T)_{\{t\}}$ und $(v)_{\{t\}}$ zuzuschreiben ist, d.h. es strömt relativ warme Luft nach Norden, also $(T)_{\{t\}}$ und $(v)_{\{t\}} > 0$, oder relativ kalte Luft nach Süden, also $(T)_{\{t\}}$ und $(v)_{\{t\}} < 0$. Bei der an Hand von Abb. 5 für den Januar 1971 durchgeführten Diskussion der durch die wandernden Wellen verursachten verfügbaren potentiellen Energie wurde mit Hilfe der zonalen Indices gezeigt, daß während dieses Monats die atmosphärische Zirkulationsform sich stark veränderte, während das im Januar 1967 nur in geringerem Maße der Fall war (Abb. 6 und 8). Ein Vergleich der Abb. 22 mit Abb. 5 und der Abb. 23 mit Abb. 6 zeigt, daß die größten nach Norden gerichteten Transporte und die größten Werte von A_{TE} an den gleichen Stellen zu finden sind. Im Januar 1971 (Abb. 22) sind die Maximalbeträge dabei wesentlich größer als im Januar 1967 (Abb. 23); man findet im Januar 1971 den größten Energieaustausch durch hauptsächlich nach Süden vordringende Kaltluft in den großen mittleren Trögen über Neufundland und Ostasien und durch hauptsächlich nach Norden vordringende Warmluft in den mittleren Hochdruckrücken über den Aleuten und über dem östlichen Teil des Atlantiks. Die Zentren im Nordwärtstransport

liegen dabei im Bereich der mittleren Lage der Polarfront.

Im Januar 1967 (Abb. 23) sind die Verhältnisse bei abgeschwächten Beträgen ähnlich, nur fehlt hier völlig der mit dem atlantischen Hochdruckrücken in Verbindung stehende Nordwärtstransport; dafür ist aber der Transport in dem in diesem Monat sehr stark ausgebildeten europäischen Kaltlufttrog besonders kräftig. Ein wesentlicher Unterschied zwischen dem Januar 1967 und Januar 1971 besteht darin, daß in letzterem Monat noch stärkere zonale Gegensätze auftreten, die nicht nur auf die starken Zentren im nach Norden gerichteten Transport zurückzuführen sind, sondern die auch darauf beruhen, daß über Kanada und der Davis-Straße gewissermaßen zur Kompensation der in diesem Monat an anderen Stellen stark nach Norden gerichteten Flüsse relativ kräftige Südwärtstransporte auftreten. Wie aus Abb. 24 am Beispiel einer als charakteristisch anzusehenden Radiosondenstation zu entnehmen ist, tritt der Transport von sensibler Energie nach Süden dabei in der Hauptsache in der mittleren Troposphäre auf und überkompensiert die schwächeren positiven Flüsse darüber und darunter.

Die hier gezeigten meridionalen Flüsse von sensibler Energie hängen unmittelbar mit dem Haushalt der verfügbaren potentiellen Energie zusammen. Durch nach Norden - entgegen dem mittleren positiven Temperaturgradienten - gerichtete Transporte erfolgt nämlich ein Transfer von zonaler in turbulente verfügbare potentielle Energie, vgl. zum Beispiel P. SPETH (1972a). Im Januar 1971 wurde demzufolge zum Abbau erhöhter meridionaler Temperaturgegensätze durch wandernde Wellen viel turbulente verfügbare potentielle Energie erzeugt; dies stimmt gut mit dem im vorigen Kapitel festgestellten Ergebnis überein, daß der Januar nämlich ebenfalls ein Maximum bezüglich A_{TE}

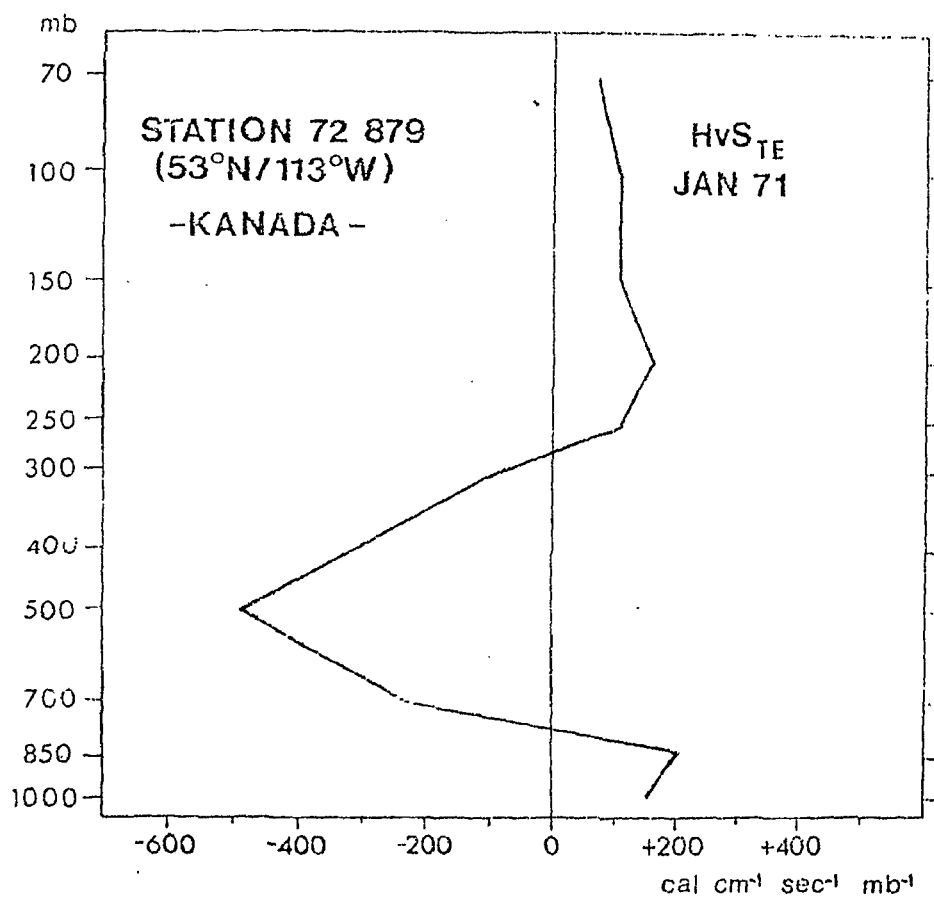


Abb. 24

Vertikalverteilung des durch die wandernden Wellen hervorgerufenen Flusses an sensibler Energie an der Station 72 879.

darstellt. Dies läßt. Dann wieder eine verstärkte Umwandlung in turbulente kinetische Energie zu, die durch starke Zyklonenaktivität während dieses Monats verursacht wird. .

Im Juli 1972 (Abb. 25) und Juli 1967 (Abb. 26) sind die Grenzen der schwachen Südwardstransporte der niederen Breiten entsprechend der Verlagerung des thermischen Äquators gegenüber den gezeigten Januar-Verteilungen weit nach Norden verschoben. Verbunden mit der Abnahme der Intensität der allgemeinen Zirkulation gehen auch die nach Norden gerichteten Transporte in den mittleren Breiten dem Betrag nach zurück. Die Maxima haben sich zwar nach Norden verschoben, sind nun jedoch südlich der mittleren Lage der Polarfront auffindbar. Dies ist dem Umstand zuzuschreiben, daß im Sommer häufig von ihrer polaren Hauptkältequelle abgeschnürte Kaltlufttropfen weit nach Süden vorstoßen und so für einen horizontalen Wärmeaustausch sorgen. Dies wird auch dadurch bestätigt, daß sich die beobachteten Maxima in den Abb. 25 und Abb. 26 über den Amerikanischen Seen, über Nowaja Semlja, über Ostasien und über den Aleuten genau dort befinden, wo in den hier nicht wiedergegebenen Mittelkarten der Temperatur gut ausgebildete Tröge zu erkennen sind. Besonders deutlich wird dies im Juli 1972, wo häufig nach Süden gerichtete Kaltluftausbrüche bis ins östliche Mittelmeer hinein erfolgten; dort sind dann auch für diese Breiten relativ hohe Werte des nach Norden gerichteten Energietransportes zu finden. Ein Vergleich der einzelnen hier nicht gebrachten Juli-Monate aus dem sechs-jährigen Zeitraum zeigt, daß keine wesentlichen Unterschiede bezüglich der Horizontalverteilungen von HvS_{TE} bestehen. Lediglich in den zonalen Mitteln stellt der Juli 1972 ein Maximum und der Juli 1967 ein Minimum dar, was gut mit den entsprechenden

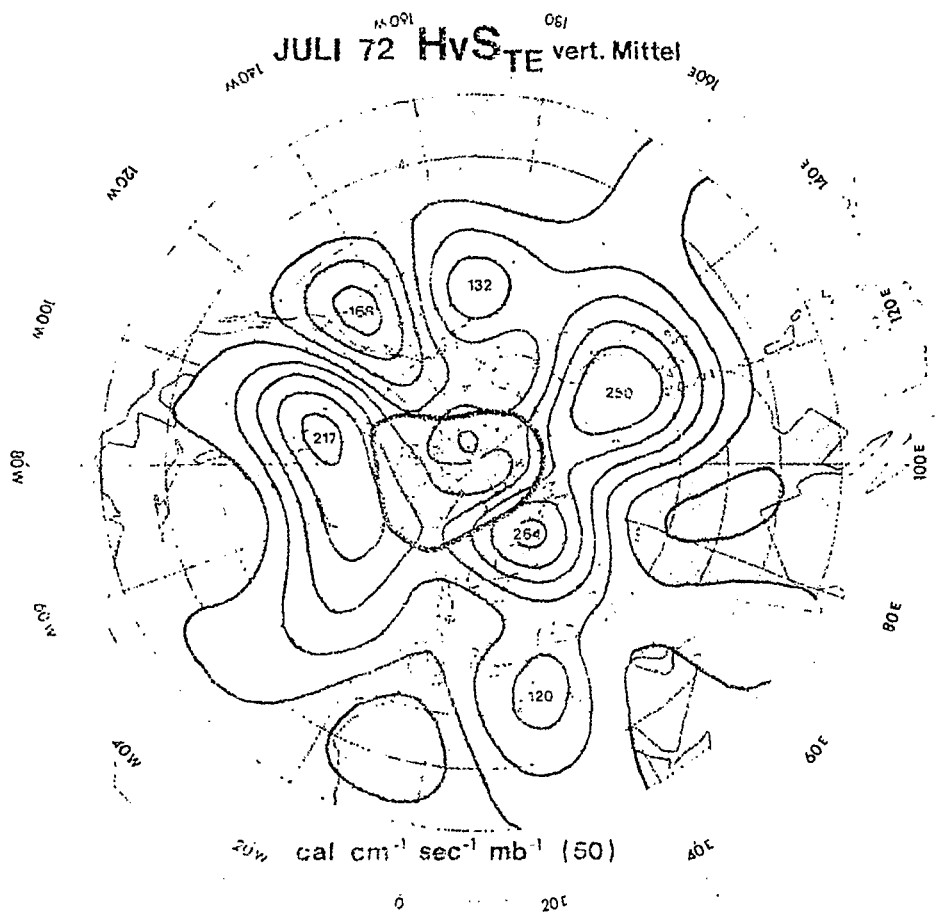


ABB. 25

Vertikales Mittel des durch die wandernden Wellen hervorgerufenen meridionalen Transportes an sensibler Energie für den Juli 1972. Sonst wie Abb. 22.

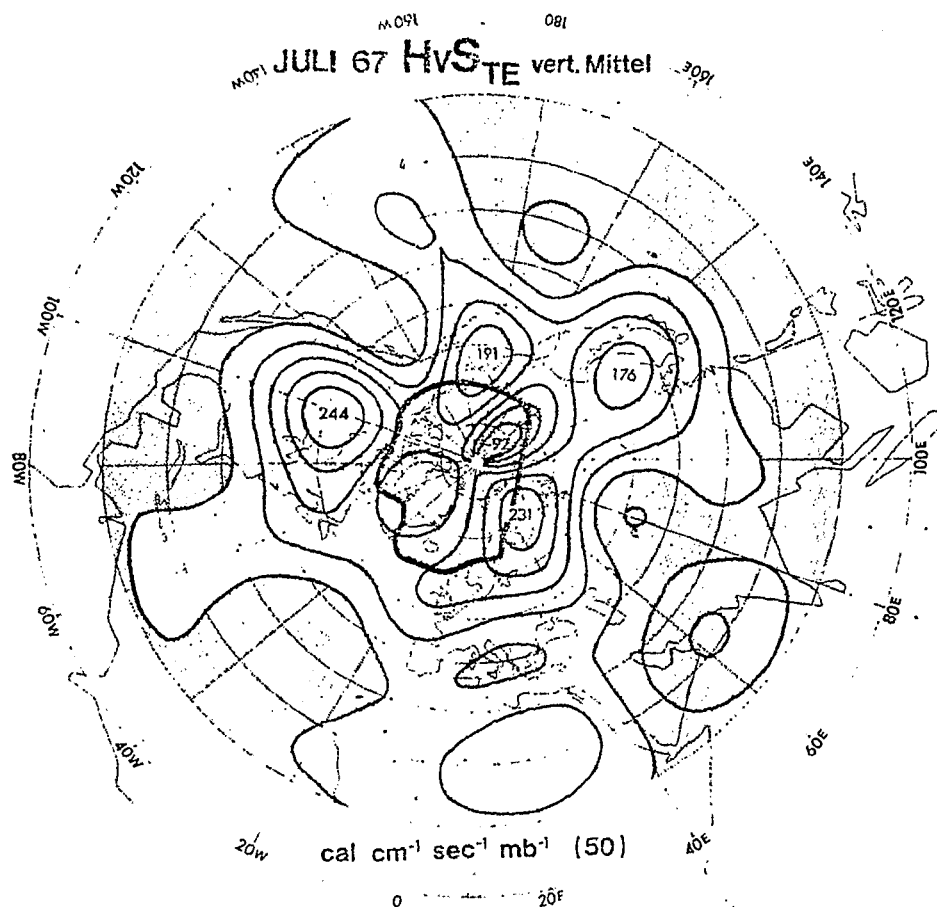


ABB. 26

Vertikales Mittel des durch die wandernden Wellen hervorgerufenen meridionalen Transportes an sensibler Energie für den Juli 1967. Sonst wie Abb. 22.

Horizontalverteilungen der durch die wandernden Wellen hervorgerufenen verfügbaren potentiellen Energie übereinstimmt, wobei übrigens genau wie im Winter die Extremas bei A_{TE} und HvS_{TE} die gleiche Lage haben. Der einzige wesentliche Unterschied zwischen den Abb. 25 und 26 besteht darin, daß im Juli 1972 an der Westküste der Vereinigten Staaten stärkere nach Süden gerichtete Energietransporte als während der anderen Sommermonate auftreten. Eine nähere Inspektion der Vertikalprofile von HvS_{TE} an den dortigen Radiosondenstationen ergibt, daß dieser negative Transport wieder in der Hauptsache aus der Höhe der mittleren Troposphäre herrührt - ähnlich wie in dem weiter oben gezeigten Beispiel für den Januar. Dies kann man als eine Kompensation der sonst relativ großen nach Norden gerichteten Flüsse ansehen.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß zwischen den einzelnen Januar-Monaten starke und gut erkennbare regionale Gegensätze im meridionalen Transport sensibler Energie bestehen; die Unterschiede zwischen den einzelnen Jahren sind im Juli jedoch nur schwach. Sowohl im Januar als auch im Juli konzentrieren sich die Maxima im meridionalen Energietransport auf bestimmte von der Jahreszeit abhängige Breitenzonen der Erde.

3.2. HORIZONTALE FLUESSE VON LATENTER ENERGIE

Betrachtet man die vertikale Abhängigkeit des durch die wandernden Wellen hervorgerufenen Flusses an latenter Energie, so stellt man fest, daß der höchste Transport in der untersten Troposphäre erfolgt, was in erster Linie eine Folge des dort vorhandenen hohen Wasserdampfgehaltes ist. Aus diesem Grunde wurde eine Vertikalintegration nur bis einschließlich

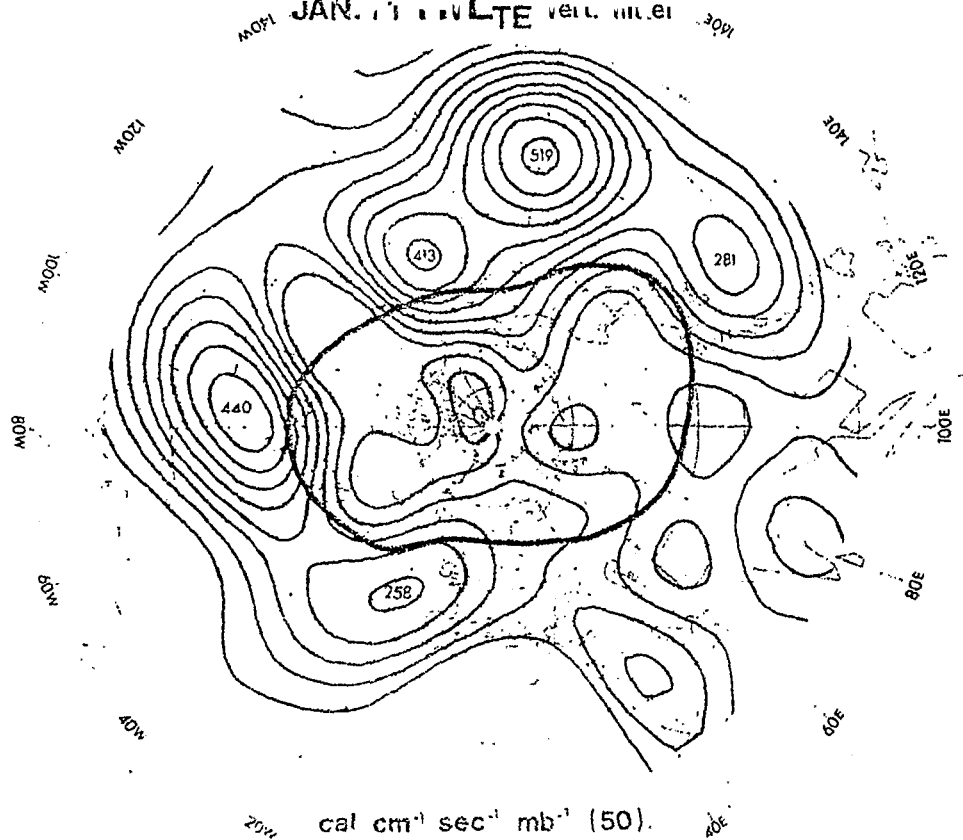


ABB. 27

Vertikales Mittel des durch die wandernden Wellen hervorgerufenen meridionalen Transportes an latenter Energie für den Januar 1971. Sonst wie Abb. 22.

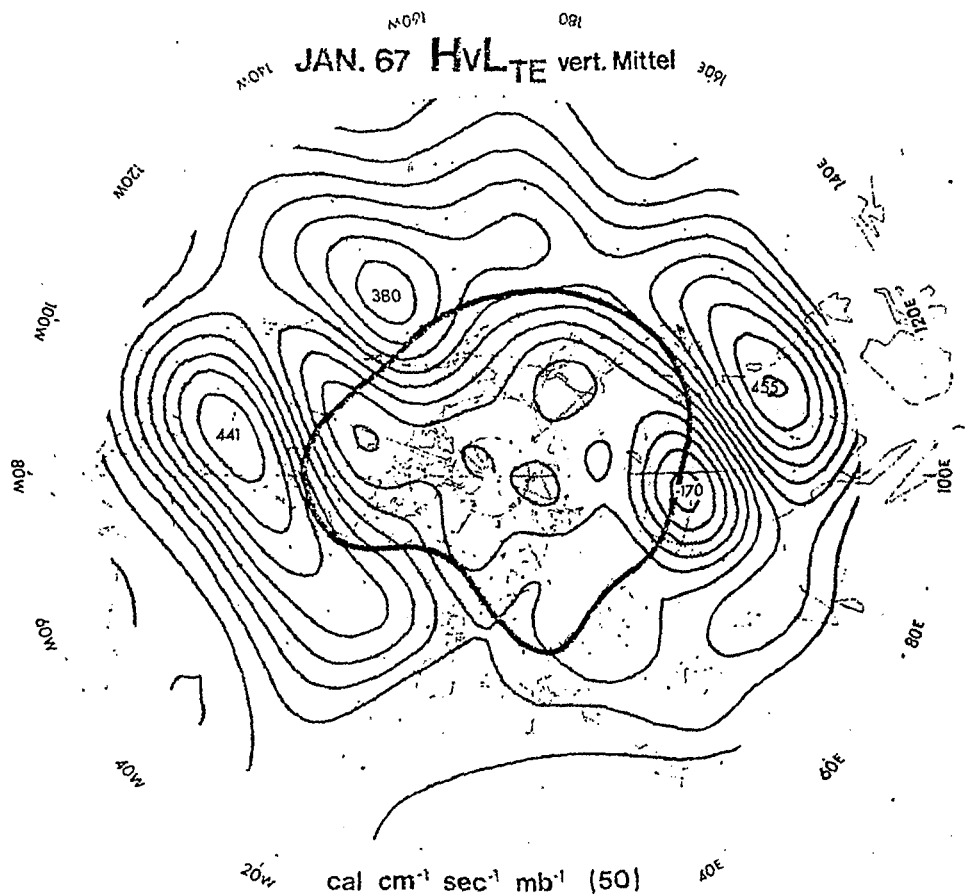
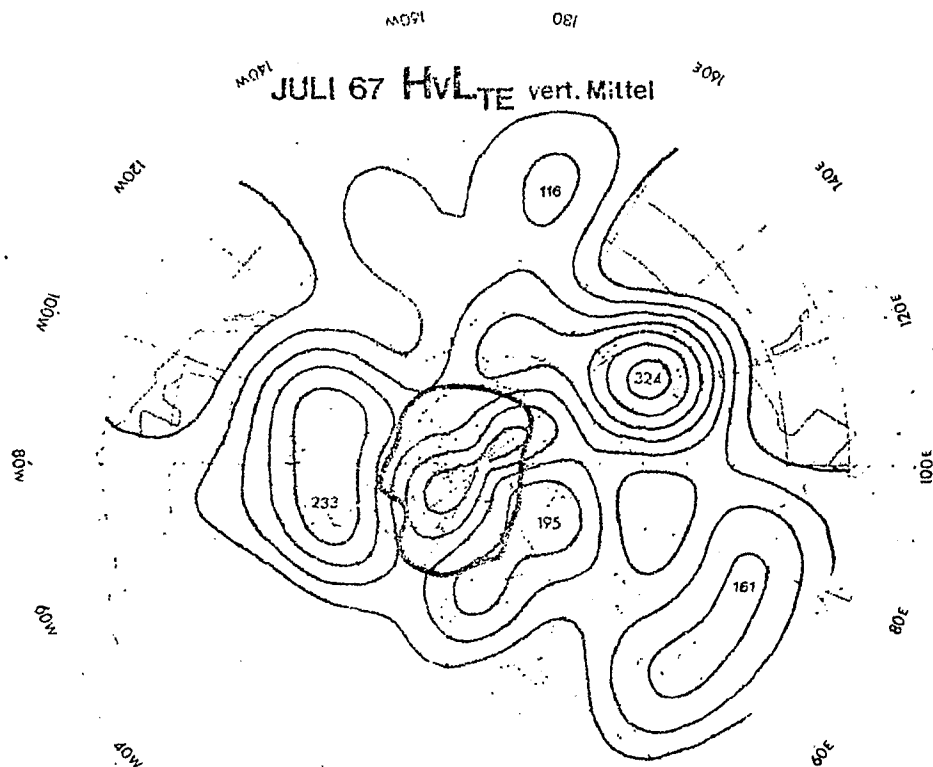


ABB. 28

Vertikales Mittel des durch die wandernden Wellen hervorgerufenen meridionalen Transportes an latenter Energie für den Januar 1967. Sonst wie Abb. 22.

subtropische Breiten vor, die dann für den beobachteten sehr hohen Transport von Feuchtigkeit direkt über der Meeresoberfläche sorgen.

Bei dem durch die wandernden Wellen hervorgerufenen meridionalen Transport an sensibler Energie wurde in Abschnitt 3.1. gezeigt, daß relativ geringe Unterschiede zwischen den einzelnen Juli-Monaten des Gesamtzeitraumes vorzufinden sind. Da dies auch bei dem durch die wandernden Wellen hervorgerufenen Transport von latenter Energie zutrifft, soll hierzu in Abb. 29 nur der Juli 1967 gezeigt werden. In diesem Sommermonat beobachtet man ganz allgemein eine Nordwärtsverlagerung des Gürtels maximalen Feuchtetransportes, was eben darauf zurückzuführen ist, daß Störungsausläufer im Sommer nicht mehr so weit nach Süden vordringen. Die starken meridionalen Flüsse über dem Ostteil Nordamerikas und dem östlichen Teil Chinas entstehen dadurch, daß dort häufig trockene kontinentale Luft $(q)_t < 0$ mit einer südwärts gerichteten Komponente der Luftbewegung $(v)_t < 0$ und feuchte ozeanische Luft $(q)_t > 0$ mit einer nordwärts gerichteten Komponente $(v)_t > 0$ anzutreffen ist; in beiden Fällen wird eine positive Korrelation zwischen $(q)_t$ und $(v)_t$ hervorgerufen, was $HvL_{TE} > 0$ bedeutet. Im Unterschied zum Januar beobachtet man im Juli 1967 jedoch noch starke positive Transporte über Skandinavien und dem Polarmeer. Dies kann folgenderweise interpretiert werden. Sowohl im Winter als auch im Sommer wird häufig feuchte Luft ozeanischen Ursprungs aus Südwesten bis in diese Gebiete transportiert; während im Winter dieser positive Fluß latenter Wärme dort zum größten Teil durch nach Norden vordringende trockene Luft aus dem asiatischen Hoch heraus kompensiert wird, wird im Sommer häufig relativ trockene



$20 \cdot 10^{11} \text{ cal cm}^{-1} \text{ sec}^{-1} \text{ mb}^{-1} \quad (50)$

ABB. 29

Vertikales Mittel des durch die wandernden Wellen hervorgerufenen meridionalen Transportes an latenter Energie für den Juli 1967. Sonst wie Abb. 22.



$10^{-7} \cdot 10^{11} \text{ cal cm}^{-2} \text{ sec}^{-1} \text{ mb}^{-1} \quad (20)$

ABB. 30

Die durch die wandernden Wellen hervorgerufenen Divergenz des gesamten (zonalen und meridionalen) Flusses an latenter Energie für den Januar 1967 bis 1972. Gebiete mit Konvergenz sind schraffiert. 10 Einheiten entsprechen einer Differenz $E - P$ von $7,8 \text{ g cm}^{-2} \text{ (3 mo)}^{-1}$.

Luft polaren Ursprungs nach Süden ins asiatische Tief hereintransportiert. Dies bedeutet dann, daß über den genannten Gebieten insgesamt $H \cdot L_{TE} > 0$ sein wird.

Für den Energiehaushalt der Atmosphäre sind die Divergenzen der bisher besprochenen horizontalen Flüsse von Bedeutung. Dies erkennt man aus der Haushaltsgleichung der totalen atmosphärischen Energie (vgl. V.P. STARR, 1951 und S.L. HASTENRATH, 1966, 1968):

$$\begin{aligned} \int \frac{\partial}{\partial t} \left\{ c_p T + Lq + gz + \frac{w^2}{2} \right\} \frac{dp}{g} &= \\ - \int \operatorname{div} \left\{ \left(c_p T + Lq + gz + \frac{w^2}{2} \right) \rho v \right\} \frac{dp}{g\rho} & \\ - \left[\left(c_p T + Lq + gz + \frac{w^2}{2} \right) \rho w \right]_0 & \\ + \left[\left(c_p T + Lq + gz + \frac{w^2}{2} \right) \rho w \right]_u + h. & \end{aligned} \quad (13)$$

Diese Gleichung besagt, daß für ein beliebiges atmosphärisches Volumen eine lokalzeitliche Änderung der totalen Summe der verschiedenen Energieformen bewirkt wird, einerseits durch eine Divergenz oder Konvergenz von horizontalen bzw. vertikalen Flüsse von totaler Energie über die äußeren Begrenzungen des Volumens hinweg und andererseits durch Quellen und Senken (nicht-adiabatische Erwärmung, Reibung, usw.), welche in der Größe h ihre Summation finden. Wie schon zu Beginn des Kapitels bemerkt wurde, können in (13) die kinetische Energie und die durch die wandernden Wellen hervorgerufenen Flüsse von potentieller Energie vernachlässigt werden. Während aus der Literatur lediglich die Divergenzen der in zonaler Richtung gemittelten meridionalen Energieflüsse bekannt sind, erlauben die bisher gezeigten Feldverteilungen der horizontalen Transporte jedoch auch eine flächenhafte Darstellung der Divergenzen. Dies wird besonders erleichtert durch die benutzte Analysenmethode mit Hilfe orthogonaler

Vektorfunktionen, da dadurch nach H. FECHNER (1974) leicht zwischen dem divergenten und rotationellen Anteil eines Vektorfeldes unterschieden werden kann. Die Divergenzen sämtlicher in dieser Arbeit präsentierten horizontalen Flüsse wurden berechnet; sie erlauben einen Einblick darin, wie horizontal verschiedene Energie in der Atmosphäre durch Flüsse akkumuliert wird. Aus Platzgründen soll hier nur die Divergenz des durch die wandernden Wellen hervorgerufenen Flusses an latenter Energie gezeigt werden. Das geschieht nicht nur deswegen, weil dies für die Meteorologie ein äußerst delikates Problem im totalen Energiehaushalt (13) darstellt, sondern auch deswegen, weil sich dadurch im Wasserhaushalt der Erde ein wichtiges Teiglied bestimmen läßt. Es läßt sich nämlich aus dem Transport von latenter Energie die Differenz Verdunstung E minus Niederschlag P berechnen:

$$\frac{1}{L} (E-P) = \int \text{div} (Lq w) \frac{dp}{g} . \quad (14)$$

W.D. SELLERS (1965) gewinnt für die Differenz Verdunstung minus Niederschlag aus klimatologischen Bodenbeobachtungen das Bild, daß im zonalen Mittel in tropischen Gebieten bis 10°N der Niederschlag gegenüber der Verdunstung überwiegt; dies ist die Zone der äquatorialen Tiefdruckrinne mit den dort häufig auftretenden Starkregenfällen. Im Bereich der vorherrschenden subtropischen Antizyklonen zwischen 10°N und 35°N überwiegt dagegen die Verdunstung, während weiter nördlich bis zum Pol durch die häufige zyklonale Störungstätigkeit der Niederschlag größer als die Verdunstung ist. Der für einen Gleichgewichtszustand daraus abgeleitete meridionale Transport des Wasserdampfes in der Atmosphäre zeigt eine gute Übereinstimmung mit den in der Literatur wiedergegebenen direkten Berechnungen von

$\int L(q-v) \frac{dp}{g}$, vgl. zum Beispiel H.M.E. van de BOOGARD (1964),
 L.A. VUORELA and I. TUCULEN (1964) und J. ADEM (1968). Wie
 ausdrücklich betont werden muß, bezieht sich das auf den totale
 Transport; eine weitere Aufschlüsselung des atmosphärischen
 Flusses nach Beziehung (2) ergibt, daß in niederen Breiten die
 mittlere Meridionalzirkulation dem Betrage nach die größte
 Divergenz hervorruft, während in mittleren Breiten der durch
 die wandernden Wellen hervorgerufene Fluß dies besorgt. Inge-
 samt wird im zentralen Mittel durch die wandernden Wellen Wasser-
 dampf von niederen Breiten in mittlere und höhere Breiten
 transportiert. In Abb. 2 ist für das sechsjährige Januar-
 Mittel 1967 bis 1972 die gesamte Divergenz (also die Summe der
 Divergenz des zonalen und des meridionalen Flusses) des durch
 die wandernden Wellen hervorgerufenen Flusses von latenter Ener-
 gie wiedergegeben. Da $10^{-7} \text{ cal cm}^{-2} \text{ sec}^{-1} \text{ mb}^{-1}$ einem Wert
 der Differenz von Verdunstung minus Niederschlag von $7,8 \text{ g cm}^{-2}$
 pro 3 Monaten entspricht, erkennt man aus dieser Abbildung,
 daß durch die wandernden Wellen in der Atmosphäre Wasser von
 den Ozeanen auf die Kontinente transportiert wird. Die in Abb. 3
 wiedergegebenen zonalen Mittelwerte von $E - P$ zeigen eine relati-
 gute Übereinstimmung mit den Werten von W.D. SELLERS (1965), da-
 er zum Beispiel für 50°N 8 g cm^{-2} pro 3 Monaten angibt gegen-
 über 6 g cm^{-2} pro 3 Monaten entsprechend den eigenen Berechnun-
 gen. Dabei muß in jedem Falle berücksichtigt werden, daß die
 Messung der Feuchte durch Radiosonden mit vielen Ungenauigkeiten
 behaftet ist. Nach den bisher vom Verfasser gemachten Erfahrun-
 gen scheint die benutzte Analysenmethode mit Hilfe orthogonaler
 Vektorfunktionen jedoch auch gut dazu geeignet zu sein, eine
 flächenhafte Verteilung der Differenz Verdunstung minus Nieder-

div HvL_{TE} JAN 67-72

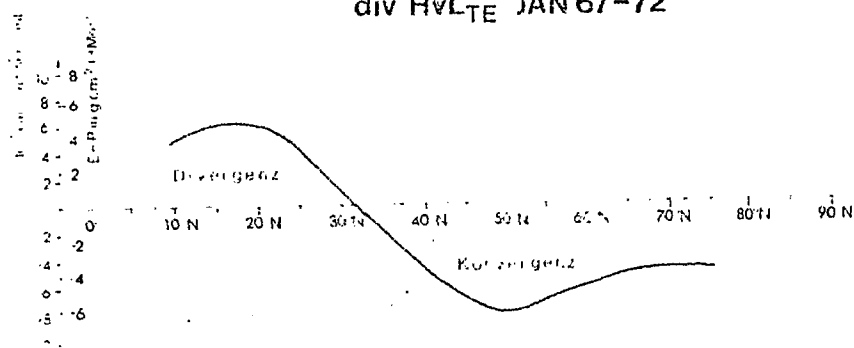


Abb. 31

Zeitrales Mittel der Divergenz des durch die wandernden Wellen hervorgerufenen Transportes an latenter Energie für den Januar 1967 bis 1972. Negative Zahlen geben eine Konvergenz an.

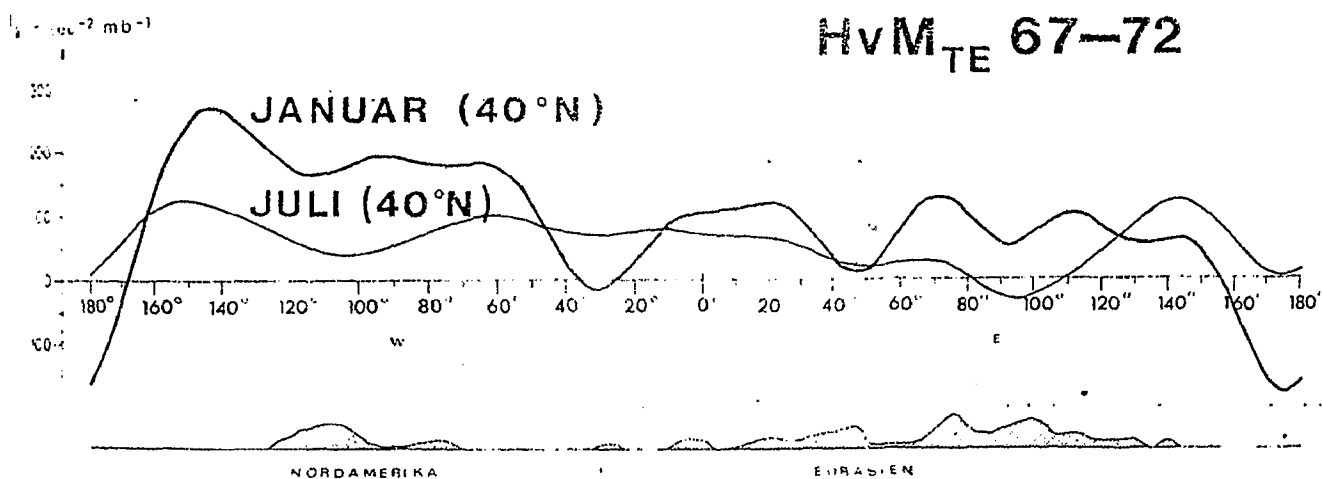


Abb. 32

Die Variabilität des durch die wandernden Wellen hervorgerufenen meridionalen Flusses von Drehmoment in Abhängigkeit von der geographischen Länge für den Januar und Juli des Gesamtzeitraumes 1967 bis 1972.

schlag aus dem atmosphärischen Feuchtefluß bestimmen zu können.

4. HORIZONTALE FLUESSE VON DREHMOMENT

Die Notwendigkeit meridionaler Transporte von atmosphärischem Drehmoment wurden erstmalig von H. JEFFREYS (1926) gefordert. Diese sind erforderlich, da in mittleren Breiten der Nordhalbkugel Westwinde vorherrschen und durch Reibung an der Grenzfläche Erde-Atmosphäre westliches Drehmoment für die Atmosphäre vernichtet wird. Auf der anderen Seite wird in den Tropen durch die dortigen Ostwinde westliches Drehmoment vom Ozean in die Atmosphäre aufwärts übertragen, was in viel geringerem Maße auch für die Polargebiete zutrifft. Da das hemisphärische Windsystem jedoch quasistationär zu sein scheint, sind auch hier horizontale Transporte von den Quellregionen der Tropen und der Polargebiete zu den Senken in mittleren Breiten notwendig. In noch größerem Maße als bei den Transporten von Energie erweist sich dabei der durch die wandernden Wellen hervorgerufene Anteil von Bedeutung. Dieser weist im zonalen und zeitlichen Mittel im Januar ein stark ausgeprägtes Maximum bei 30°N auf, das sich im Juli um etwa 10° nach Norden verschiebt. Rechnungen hierzu wurden für den sechsjährigen Zeitraum 1967 bis 1972 in einem analogen Sinne, wie im Kapitel 3 beschrieben, ebenfalls von P. SPETH (1974b) durchgeführt. An Hand derselben Monate wie in Kapitel 3, soll hier die Veränderlichkeit des durch die wandernden Wellen hervorgerufenen meridionalen Transportes von Drehmoment geschildert werden. Dieser Transport ist gegeben durch

$$HvM_{TE} = \int R \left[(u)_{(t)} (v)_{(t)} \right]_{(t)} \cos \phi \frac{dp}{g} , \quad (15)$$

mit dem Abstand von der Erdachse $R = a \cos \phi$. Die Abb. 32 zeigt, daß dabei ähnlich wie bei dem durch die wandernden Wellen her-

vorgerufenen Transport an sensibler und latenter Energie starke regionale Gegensätze auftreten. Die Richtung und Intensität der Flüsse wird von der horizontalen Neigung der Trogachsen gegen die Meridiane bestimmt, worauf schon V.P. STARR (1948) hingewiesen hat; eine Orientierung der Trogachsen von SW nach NE bringt eine solche Korrelation der Geschwindigkeitskomponenten mit sich, daß dadurch ein nach Norden gerichteter Fluß von Drehmoment hervorgerufen wird, während das Umgekehrte für eine Orientierung der Achsen von SE nach NW der Fall ist.

Wie für die Flüsse von sensibler und latenter Energie werden zur Betrachtung der durch die wandernden Wellen hervorgerufenen Transporte von Drehmoment aus dem Gesamtzeitraum der Januar 1971 (Abb. 33) und der Januar 1967 (Abb. 34) herausgegriffen. Man entnimmt der Abb. 33 und 34, daß in diesen beiden Januar-Monaten die größten nach Norden gerichteten Transporte hauptsächlich südlich der mittleren Lage der Polarfront über den Vereinigten Staaten und dem östlichen Teil des Pazifiks auftreten, wie dies schon in dem mittleren sechsjährigen Zonalschnitt der Abb. 32 zum Ausdruck kam; ein weiteres Gebiet mit positiven Flüssen ist außerdem noch südlich von Japan zu finden. Während diese Gebiete südlich der mittleren Lage der Polarfront anzutreffen sind und mit der Mäandrierung des subtropischen Strahlstromes zusammenhängen, findet man sowohl im Januar 1971 als auch im Januar 1967 ein weiteres Zentrum in der zentral-asiatischen Kaltluft-Region. In den übrigen Gebieten nördlich der Polarfront wird in beiden Monaten Bewegungsmoment vorwiegend nach Süden transportiert, besonders über Kanada und dem Bering-Meer. Im Januar 1971 setzt sich ein Gebiet mit negativen Werten von HvM_{TE} zungenförmig bis weit in den Pazifik fort, während dies im Januar 1967 für den Atlantik der Fall ist.

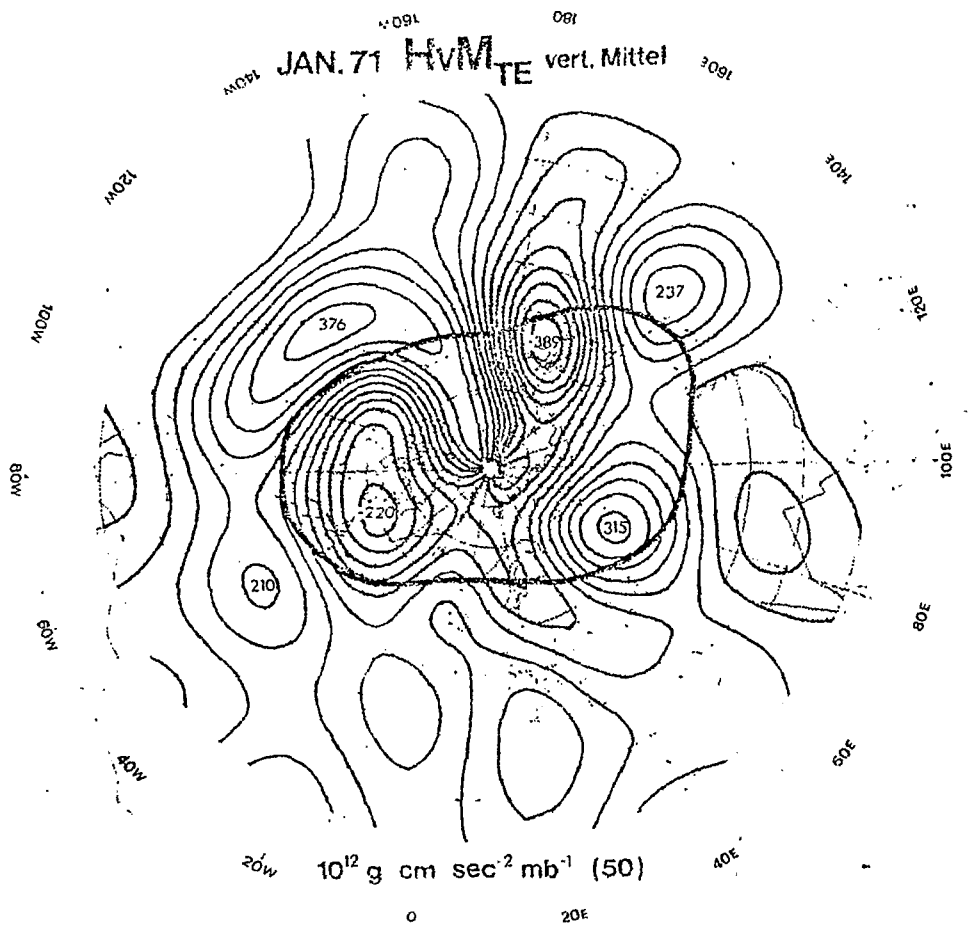


Abb. 33

Vertikales Mittel des durch die wandernden Wellen hervorgerufenen meridionalen Transportes von Drehmoment für den Januar 1971. Sonst wie Abb. 22.

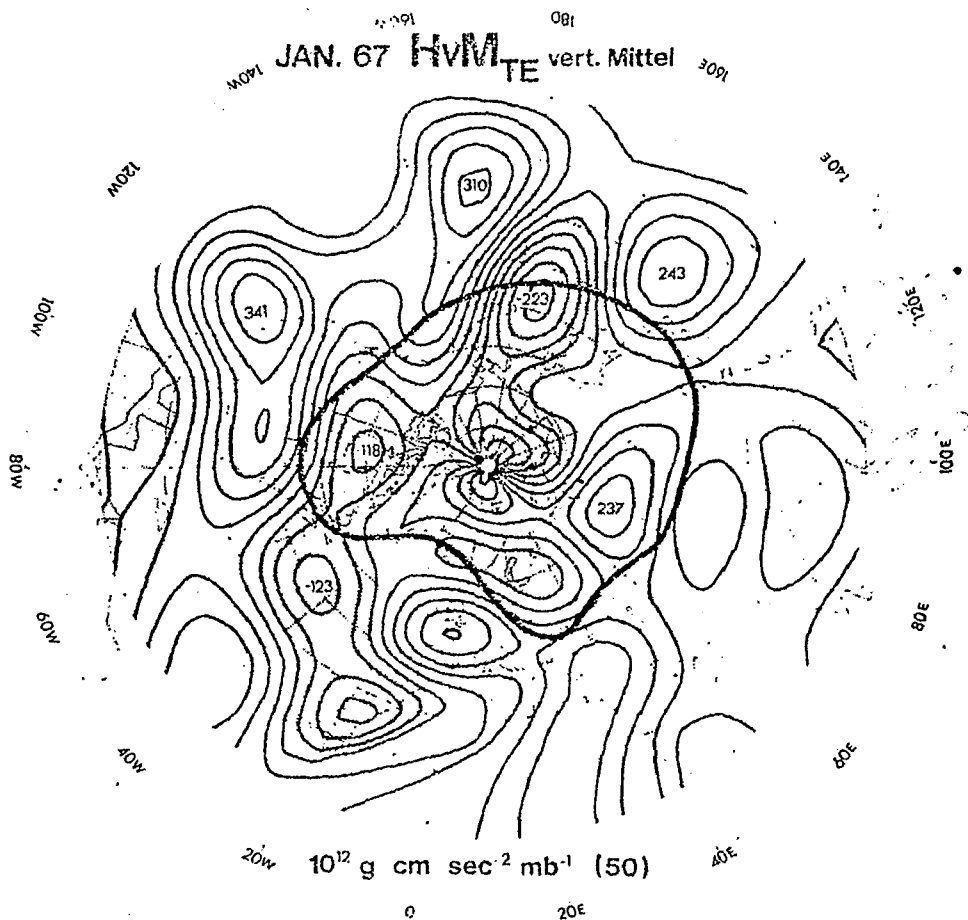


Abb. 34

Vertikales Mittel des durch die wandernden Wellen hervorgerufenen meridionalen Transportes von Drehmoment für den Januar 1967. Sonst wie Abb. 22.

Allgemein läßt sich also feststellen, daß die Trogachsen im Januar in denjenigen Gebieten nördlich der mittleren Lage der Polarfront, die häufig von Störungen berührt werden, vorzugsweise eine Orientierung von SE nach NW aufweisen. Wie man aus einem Vergleich der Abb. 33 und 34 erkennt, ist dies in dem Monat verstärkt der Fall, in welchem besonders heftige Wellenbildungen erfolgten, d.h. im Januar 1971. In diesem Monat sind dann aus denselben Grunde auch die Maxima der nach Norden gerichteten Transporte wesentlich größer als im Januar 1967; dies bewirkt, daß im Januar 1971 die Konvergenz des durch die wandernden Wellen hervorgerufenen meridionalen Transportes von westlichem Drehmoment im Gebiet der stärksten Westwinde am größten ist.

Zur Veranschaulichung der Wirkungsweise des durch die wandernden Wellen hervorgerufenen meridionalen Transportes von Drehmoment ist in Abb. 35 für das Januar-Mittel 1967 bis 1972 noch der Term

$$\int R \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \left[(u)_t \right] (v)_t \right\} \cos \phi \frac{dp}{g} \quad (16)$$

dargestellt. Man sieht daraus anschaulich, daß im Bereich der mittleren Lage der Polarfront westliches Drehmoment akkumuliert wird, wo es zur Aufrechterhaltung des Westwindes gegen die Bodenreibung verwendet wird. Als Quellen des meridionalen Transportes wirken dabei die Atmosphäre der niederen Breiten und zum Teil auch das Gebiet in polaren Breiten.

Die Verteilungen von HvM_{TE} für die Sommermonate sollen an dieser Stelle nicht weiter diskutiert werden, da diese keine größere Veränderlichkeit in Bezug auf die einzelnen Monate aufweisen.

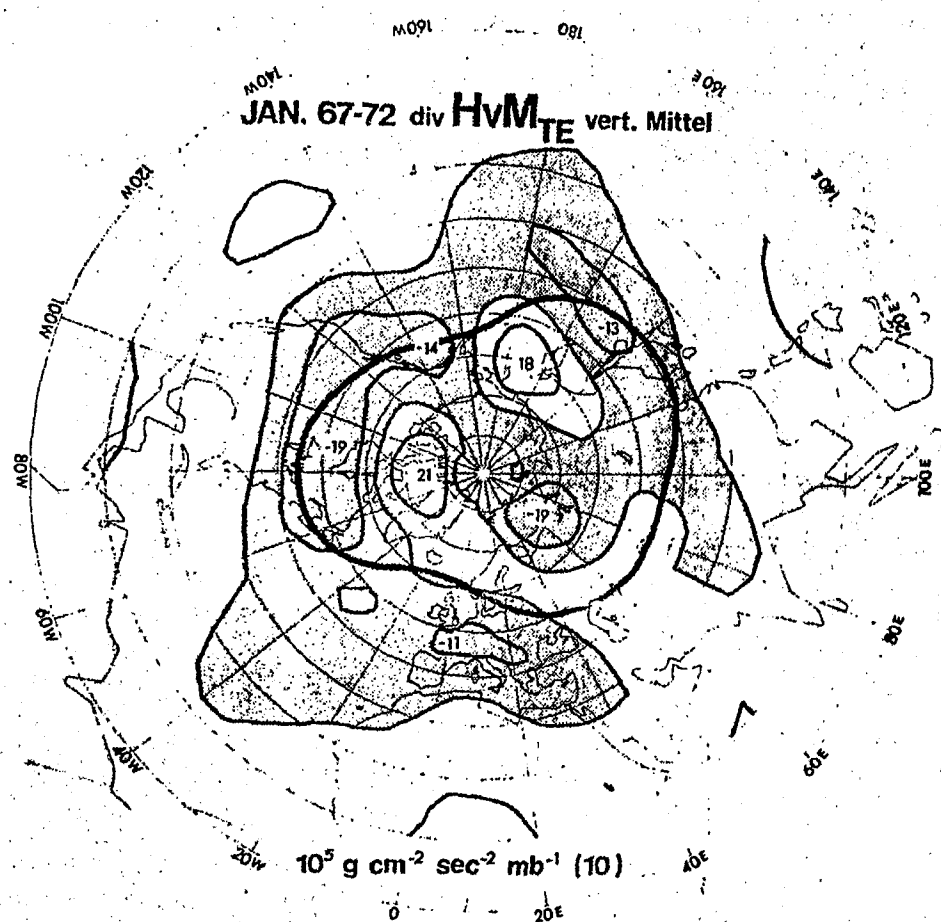


ABB. 35

Die Divergenz des durch die wandernden Wellen hervorgerufenen meridionalen Transportes von Drehmoment für den Januar 1967 bis 1972. Negative Zahlenwerte geben eine Konvergenz an und sind schraffiert. Die mittlere Lage der Polarfront ist durch die dick ausgezogene Linie gekennzeichnet.

5. SPEKTREN DER HORIZONTALEN FLUESSE VON SENSIBLER ENERGIE UND DREHMOMENT

Um einen weiteren Einblick in den zeitlichen Ablauf der großskaligen horizontalen Transporte von sensibler Energie und von Drehmoment zu erlangen, sollen diese am Ozeanwetterschiff "C" - auf der Position $53^{\circ}\text{N}/36^{\circ}\text{W}$ südöstlich von Grönland - einer näheren Betrachtung unterzogen werden. Dabei soll der durch die wandernden Wellen hervorgerufene Beitrag, den Bewegungsvorgängen verschiedener Frequenz zum gesamten Mittelwert beisteuern, untersucht werden. Dieses Vorhaben folgt dem Konzept der Arbeiten von M.A. ESTOQUE (1954), WAN-CHENG CHIU (1960) und R.R. BROOK (1971) und basiert auf der Berechnung der Co-Spektren. Das Co-Spektrum ist dabei so definiert, daß für eine 1 mb dicke Schicht für den meridionalen Transport sensibler Energie gilt:

$$\frac{c_p}{g} \left[(T)_{(t)} (v)_{(t)} \right]_{(t)} = \frac{c_p}{g} \int_0^{\infty} Co_{T,v} (v) dv, \quad (17)$$

und für den Transport an Drehmoment:

$$R \cos \phi \left[(u)_{(t)} (v)_{(t)} \right]_{(t)} = R \cos \phi \int_0^{\infty} Co_{u,v} (v) dv \quad (18)$$

Dabei sind die wandernden Wellen jeweils durch die Frequenz v charakterisiert; die Integranden in (17) und (18) geben die Beiträge von Wellen im Frequenzbereich zwischen v und dv zum gesamten Mittelwert an, der in den Beziehungen auf der linken Seite steht. In dieser Studie werden die Ergebnisse so dargestellt, daß auf der Abszisse die Frequenz in einem logarithmischen Maßstab und auf der Ordinate das Produkt aus der Energieflußdichte - bzw. der Energiedichte bei der verfügbaren potentiellen Energie - und der Frequenz abgetragen wird. Diese in Meteorologie häufig verwendete Darstellungsart wird deshalb g

wählt, weil dadurch der hohe Energiegehalt bei tiefen Frequenzen gegenüber dem der hohen Frequenzen unterdrückt wird und außerdem dadurch wieder eine flächentreue Abbildung hergestellt wird, da $\int v Co(v) d(\ln v) = Co(v) dv$ gilt:

Als Daten dienten die vom U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE - NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION auf Magnetband übernommenen Radiosondenaufstiege in zwölfstündigem Abstand vom Juni 1946 bis Juni 1966. Dadurch ist eine Nyquist-Frequenz von 1 Schwingung pro Tag gegeben. Da zu erwarten war, daß sich für den Periodenbereich von 4 Tagen - der dem mittleren Intervall zwischen der Passage verschiedener Wellenstörungen entspricht - Maxima im Transport ergeben würde, wurde die ganze zwanzigjährige Meßreihe in mehrere Teilstücke von jeweils 256 Meßwerten (= 128 Tage) zerlegt. Dadurch erhält man Spektralwerte in Frequenzbanden, die um die Frequenzen $v = K/128$ Schwingungen pro Tag zentriert sind mit $K = 0, 1, \dots, 128$. Die insgesamt ursprünglich zwanzigjährige Meßreihe mußte auf die Verarbeitung von 10240 Daten - von ursprünglich 14670 - reduziert werden, da gegen Ende des Zeitraumes zu viele Meldungen fehlten. Innerhalb des betrachteten Zeitraumes fehlten weniger als 10 % Werte, die zur Vervollständigung der Meßreihen linear interpoliert wurden.

In der Abb. 36 sind die Spektren der verfügbaren potentiellen Energie in den Niveaus 850 mb, 500 mb und 300 mb abgetragen, wobei der Einfachheit halber zur Berechnung der Stabilitätsfaktor γ aus Abb. 1 benutzt wurde. Aus zeichentechnischen Gründen mußten auf der Ordinate verschiedene Maßstäbe gewählt werden. Man erkennt aus dieser Abbildung, daß in 500 mb in Übereinstimmung mit Abb. 2 durch die wandernden Wellen

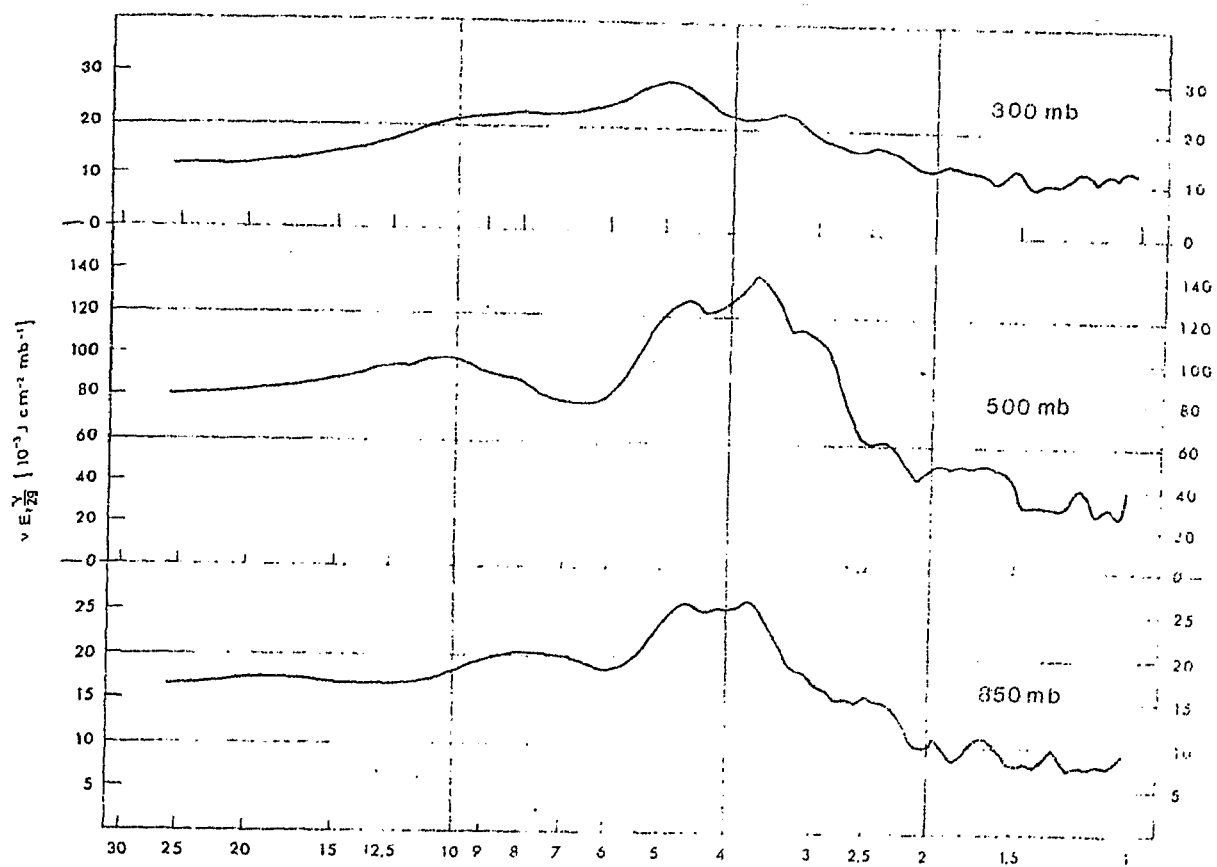


Abb. 36

Spektren der verfügbaren potentiellen Energie am Ozeanwetterschiff "C"

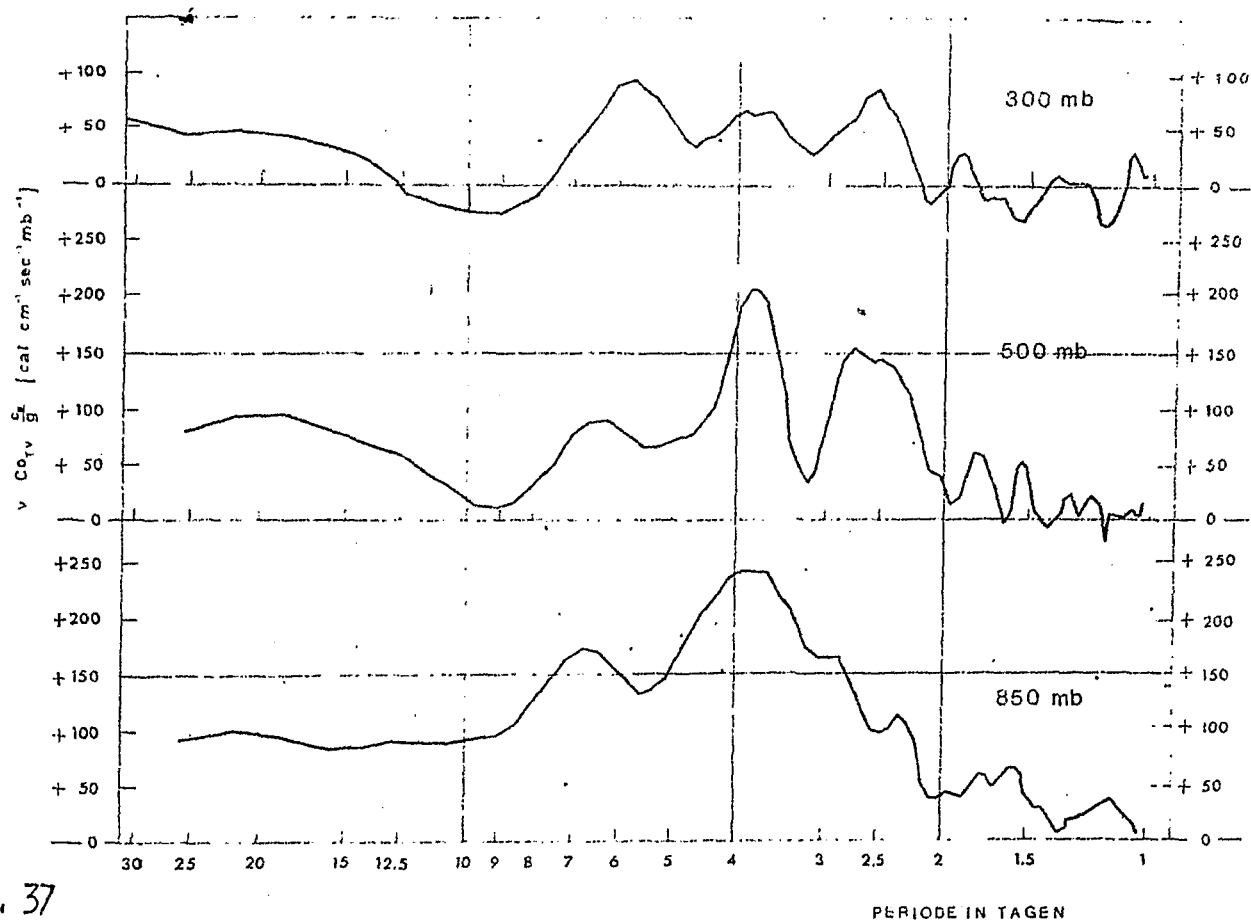


Abb. 37

Spektren der meridionalen Flüsse von sensibler Energie am Ozeanwetterschiff "C".

besonders hohe Werte an verfügbarer potentieller Energie hervorgerufen werden. In den gezeigten Niveaus treten Maxima zwar im Periodenbereich in der Umgebung von 4 Tagen auf, die jedoch nur schwach ausgebildet sind, da längerperiodische Vorgänge ebenfalls sehr hohe Beiträge zur verfügbaren potentiellen Energie beisteuern.

Die Spektren des meridionalen Transportes an sensibler Energie für verschiedene Niveaus sind in der Abb. 37 dargestellt. Ein positiver Wert auf der Ordinate gibt einen nach Norden gerichteten Transport an und ein negativer Wert einen nach Süden gerichteten. Man erkennt aus dieser Abbildung, daß in allen betrachteten Höhen fast ausschließlich ein nach Norden gerichteter Transport erfolgt. Aus dem in Abb. 37 unten dargestellten Spektrum entnimmt man, daß der Fluß sensibler Energie im 850 mb-Niveau am größten ist. Weiterhin beobachtet man in 850 mb und 500 mb im Periodenbereich von 4 Tagen das erwartete breitgestreckte Maximum im nach Norden gerichteten Transport, das in 500 mb allerdings bei einer Periode von 3,2 Tagen durch ein relatives Minimum zu dem sekundären Maximum bei 2,5 Tagen getrennt ist. Aus dieser Darstellung erkennt man anschaulich, daß die synoptischen Störungen den größten Transport von sensibler Energie nach Norden bewirken, da der Periodenbereich von 4 Tagen der Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Störungen entspricht - wie schon weiter oben erwähnt wurde. Ein weiteres Maximum beobachtet man in 850 mb und 500 mb im Periodenbereich von 7 Tagen, dessen synoptische Zuordnung nicht ohne weiteres vorgenommen werden kann; längere Perioden bewirken dagegen nur relativ kleine Nordwärtstransporte.

Im 300 mb-Niveaust dagegen das Maximum bei 4 Tagen etwas unterdrückt; man findet jedoch im gesamten Periodenbereich zwischen 2,5 und 4 Tagen relativ größere Transporte.

Im auffälligen Unterschied zu den Flüssen von sensibler Energie zeigt sich bei den Flüssen von Drehmoment in Abb. 38, daß durch die synoptischen Störungen kein bevorzugter Transport nach Norden folgt. Während im 850 mb-Niveau durch Perioden von kleiner 5 Tagen ausschließlich Drehmoment nach Süden transportiert wird, ist dies in 500 mb zwar auch noch überwiegend der Fall, man erkennt hier jedoch schon zwei Spitzen mit Nordwärts-transport bei 2,5 und 3,5 Tagen, wodurch für kürzere Perioden insgesamt ein jetzt nur noch kleiner nach Süden gerichteter Fluß verglichen mit jenem im 850 mb bewirkt wird. In 300 mb findet man ähnliche Verhältnisse wie in 500 mb vor, nur ist die Veränderung in Bezug auf die Periode wesentlich größer. Die längerperiodischen Wellen liefern in den Höhen einen positiven Beitrag zum Gesamtfluß. Dieser ist im 300 mb-Niveau am größten und nimmt nach unten hin ab. Ein besonderer Unterschied zwischen dem durch die wandernden Wellen hervorgerufenen meridionalen Transport an sensibler Energie und an Drehmoment besteht darin, daß bei letzteren längerperiodische Vorgänge, die mit Umstellungen der Zirkulation zusammenhängen, einen hohen Beitrag zu dem Gesamtfluß liefern.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß beim Ozeanwetter-schiff "C" in dem mit den synoptischen Störungen zusammenhängenden Periodenbereich lediglich bevorzugt sensible

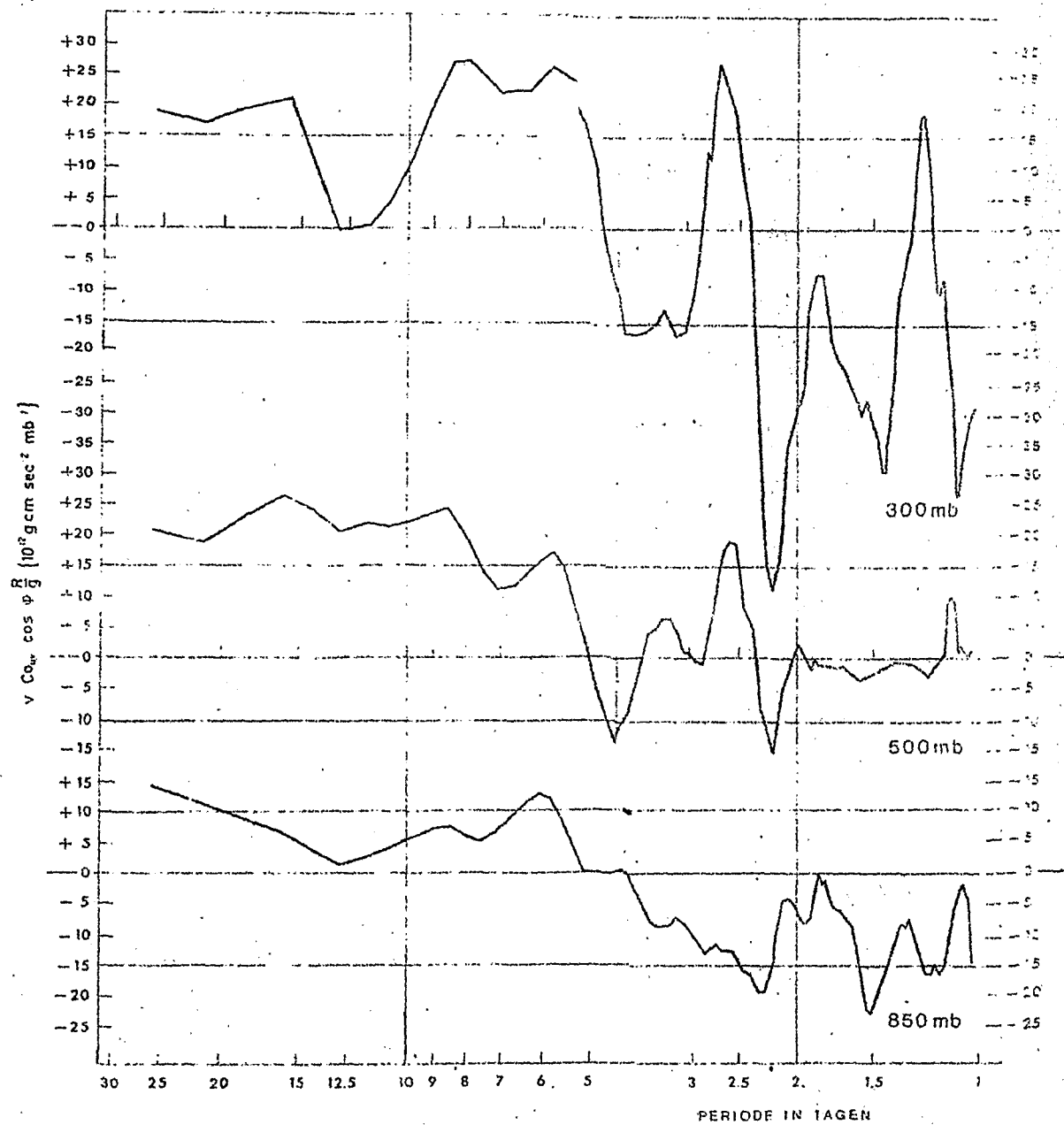


ABB. 38

Spektren der meridionalen Flüsse von Drebent am Ozeanwetterschiff "C".

Energie nach Norden transportiert wird, während für den Nordwärtstransport von Drehmoment die längerperiodischen Vorgänge von Wichtigkeit sind. Durch die synoptischen Störungen werden ebenfalls hohe Werte an verfügbarer potentieller Energie hervorgerufen.

6. DER DURCH BESONDERE INTENSIVE AUSSERTROPISCHE ZYKLONEN HERVORGERUFENE MERIDIONALE TRANSPORT AN SENSIBLER WÄRME UND AN DREHMOMENT

In den Abschnitten 3.1. und 5. wurden die durch die wandernden Wellen hervorgerufenen horizontalen Flüsse von sensibler Energie und von Drehmoment für die gesamte Nordhalbkugel als zeitliche Mittelwerte über jeweils einen Monat betrachtet. Im Abschnitt 5 erfolgte eine spektralanalyse dieser Flüsse am Ozeanwetterschiff "C" um zu untersuchen, ob es einen Frequenzbereich gibt, in dem ein besonders großer Transport erfolgt. Es stellt sich heraus, daß ein solcher für die sensible Energie existiert und durch den zeitlichen Abstand gegeben ist, mit dem Störungen in mittleren Breiten über einem festen Punkt hinwegziehen. In diesem Kapitel soll nun noch untersucht werden, wie sich im Verlauf der Entwicklung einiger ausgewählter Tiefdruckstörungen die damit zusammenhängenden Flüsse ändern. Dabei handelt es sich um eine Betrachtungsart im Sinne von LAGRANGE. Herangezogen wurde der Zeitraum zwischen dem 14. Februar 00 GMT und dem 17. Februar 12 GMT 1962. Während dieses Zeitraumes bildeten sich zu Beginn über dem Nordatlantik zwei starke Tiefdruckstörungen aus, die im

weiteren Verlauf über dem norddeutschen Küstenland in Verbindung mit einer Flut große Zerstörungen hervorriefen. Es handelt sich um die sogenannte "Hamburger Sturmflutzyklone". Das betrachtete Gebiet erstreckt sich von 60°W bis 30°E und von 40°N bis 50°N . Gegen Ende des untersuchten Zeitraumes bildeten sich im Westen des Gebietes dann noch zwei weitere intensive Störungen. Die Synoptik dieser Sturmflutwetterlage ist im einzelnen bei FR. DEFANT, H. FECHNER, P. SPETH (1973) wiedergegeben. Mit dem Haushalt der verfügbaren potentiellen Energie und der kinetischen Energie für diese Zyklonen befassen sich P. SPETH (1972a) und H. FECHNER (1972a, 1972b); bei P. SPETH (1972b) ist das energetische Zustandekommen der außerordentlich intensiven Tiefdruckstörungen beschrieben.

Da es sich bei den hier betrachteten Störungen um einen relativ kurzen Zeitraum handelt, können nicht die durch die wandernden Wellen hervorgerufenen Flüsse berechnet werden, sondern für jeden einzelnen Termin nur jeweils der meridionale Gesamtfluß an sensibler Energie:

$$HvS_{\text{TOC}} = \int c_p T v \frac{dp}{g} \quad (1)$$

und an Drehmoment:

$$HvM_{\text{TOC}} = \int r u v \cos \phi \frac{dp}{g} \quad (2)$$

Horizontalverteilungen dieser Gesamtflüsse für die Atmosphäre der Nordhalbkugel wurden von P. SPETH (1974b) in den dortigen Abb. 14 und 2 (für das sechsjährige Januar-Mittel 1967 bis 1972 gezeigt). Da die absolute Temperatur T nur positive Zahlenwerte annehmen kann und die zonale Geschwindigkeitskomponente u ebenfalls in mittleren Breiten im allgemeinen positiv

ist, bestimmt allein das Vorzeichen der meridionalen Windkomponente, in welcher Richtung die Transporte erfolgen. Streng nach Süden gerichtete Flüsse von sensibler Energie und Drehmoment beobachtet man deshalb an der Rückseite der mittleren atmosphärischen Tröge über Amerika, Europa und Asien. An der Vorderseite der beiden im Januar besonders kräftig ausgebildeten Tröge über Amerika und Asien ist der Transport dagegen nach Süden gerichtet. Obwohl im zonalen Mittel die Gesamtflüsse und die durch die wandernden Wellen hervorgerufener Flüsse die gleiche Größenordnung haben, läßt dies nicht mehr auf die einzelnen Werte in den Horizontalanteilen zu, da die Temperatur und die Windkomponenten (11) und (2c) eine andere Größenordnung als die entsprechenden Abweichung von den zeitlichen Mittelwerten in (11) und (15) haben. Man entnimmt den oben genannten Abbildungen, daß im sechsstündigen Mittel die Extremas beim Gesamtfluß an sensibler Energie Werte von $+421 \cdot 10^2$ bzw. $-358 \cdot 10^2 \text{ cal cm}^{-1} \text{ sec}^{-1} \text{ mb}^{-1}$ und beim Gesamtfluß von Drehmoment Werte von $+824 \cdot 10^{12}$ bzw. $-622 \cdot 10^{12} \text{ g cm sec}^{-2} \text{ mb}^{-1}$ annehmen.

Für das gesamte Gebiet von 60°W bis 30°E und von 40°N bis 75°N wurden an Gitterpunkten die genannten meridionalen Flüsse berechnet und anschließend vertikal integriert. Eine maschinell durchgeführte zeichnerische Analyse dieser Werte zeigte deutlich, daß die stärksten Transporte bei der Entwicklung einer Störung dabei über dem Tiefdruckzentrum bzw. dem Okklusionspunkt zu finden sind. Um diese Punkte herum wurden die Flüsse deshalb über eine Fläche von 10 Längengraden in zentraler Richtung und von 5 Breitengraden in meridionaler Richtung gemittelt.

Die Ergebnisse dazu sind in der Tabelle 1 dargestellt, wo ebenfalls die geographischen Koordinaten der Flächenmittel angegeben sind. Bezüglich der synoptischen Beschreibung der Störungen wird auf Fr. DEFANT, H. FECHNER, P. SPETH (1972) verwiesen. In dem Zeitraum vom 14.2. 00 GMT bis zum 12.2. 12 GMT konnte die Entwicklung von insgesamt vier verschiedenen Störungen beobachtet werden, die jedoch nur für längstens sechs synoptische Termine verfolgt werden konnten, da sie danach aus dem betrachteten atmosphärischen Volumen nach Osten auswanderten. Man entnimmt der Tabelle 1, daß zu Beginn der Entwicklung der einzelnen Störungen in hohem Maße sensible Energie und Drehmoment nach Norden transportiert werden, deren Beträge hoch über den weiter oben genannten Maxima der zeitlichen Mittelwerte liegen. Mit Überschreiten des Reifestadiums der Zyklonen können diese Transporte ab, bis sie dann sogar nach Süden gerichtet sind, was bei den gebrachten Beispielen wegen des begrenzten Gebietes nur bei den Zyklonen A und B beobachtet werden konnte. Da die Zyklonen A am 16.2. 00 GMT und die Zyklone B am 17.2. 00 GMT schon in der Auflösung begriffen war, kann gesagt werden, daß die Südwärtstransporte gegen Ende der Entwicklung dem Betrag nach wesentlich kleiner als die Nordwärtstransporte zu Beginn sind. Zusammenfassend läßt sich also feststellen, daß die mit der Entwicklung einer Zyklone verknüpften Transporte insgesamt nach Norden gerichtet sind.

7. AUSBLICK

In den vorangegangenen Kapiteln wurde versucht, die Veränderlichkeit der atmosphärischen Zirkulation durch Betrachtung

Datum GMT	Zyklone A			Zyklone B			Zyklone C			Zyklone D		
	Position	HvS	HvM	Position	HvS	HvM	Position	HvS	HvM	Position	HvS	HvM
14.2. 00	57N/45W	1374	1632	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14.2. 12	65N/35W	1124	1897	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15.2. 00	65N/15W	207	120	55N/42W	1084	2166	-	-	-	-	-	-
15.2. 12	65N/ 5E	-189	-762	62N/20W	297	140	-	-	-	-	-	-
16.2. 00	57N/10E	-689	-1508	62N/ 2E	16	17	47N/52W	1148	118	-	-	-
16.2. 12	-	-	-	57N/ 2E	-	-	-	-	-	-	-	-
17.2. 00	-	-	-	47N/20E	-24	-328	50N/40W	1110	1388	45N/47W	963	468
17.2. 12	-	-	-	-	-	-	55N/25W	598	1068	55N/42W	1239	1039

Tabelle 1

Die durch vier besonders intensive außertropische Zyklonen hervorgerufenen meridionalen Transporte von sensibler Energie und von Drehmoment.

HvS: gesamter meridionaler Transport von sensibler Energie in $10^2 \text{ cal cm}^{-1} \text{ sec}^{-1} \text{ mb}^{-1}$

HvM: gesamter meridionaler Transport von Drehmoment in $10^{12} \text{ g cm sec}^{-2} \text{ mb}^{-1}$.

der verfügbaren potentiellen Energie und der großskaligen horizontalen Flüsse von sensibler und latenter Energie und von Drehmoment anschaulich zu schildern. Dies erfolgte in der Hauptsache mit Hilfe der durch die wandernden Wellen hervorgerufenen Beiträge. Da aber auch die mit der mittleren Meridionalzirkulation und den stehenden Wellen - die nur für die verfügbare potentielle Energie in dieser Arbeit untersucht wurden - verbundenen Anteile auf keinen Fall vernachlässigt werden können, sollen diese in einer weiteren Studie näher durchleuchtet werden. Aus den hier gezeigten Horizontalverteilungen der verschiedenen betrachteten Größen konnte man erkennen, daß eine starke räumliche Veränderlichkeit derselben besteht. Deshalb ist beabsichtigt, sämtliche anderen Terme aus den entsprechenden Haushaltsgleichungen der verfügbaren potentiellen Energie, der totalen atmosphärischen Energie und des Drehmomentes ähnlich detailliert zu betrachten, da dadurch ein vollständiger Einblick in das energetische Geschehen der Atmosphäre erlangt werden kann. Durch eine Präsentation von ausgewählten Januar- und Juli-Monaten konnte man einen Eindruck über die zeitliche Veränderlichkeit der verschiedenen Größen gewinnen. Dabei wurden Unterschiede zwischen dem Winter und dem Sommer besonders augenfällig; um nun auch über die dazwischenliegenden Zeiten eine Aussage machen zu können, ist eine Untersuchung über die energetischen Vorgänge im Frühjahr und Herbst in Vorbereitung. Eine weitere Aussage über die zeitliche Veränderlichkeit wird sich zusätzlich durch eine Ausweitung der in Kapitel 5 gezeigten Spektren in Hinblick auf die Bearbeitung längerer Perioden und mehrerer Höhenstufen erhofft.

Alle diese geplanten Unternehmungen werden davon abhängen, wieviel maschinelle Rechenzeit zur Verfügung gestellt werden kann, die in hohem Maße benötigt wird.

Die in dieser Arbeit dargestellten Resultate sind nach Ansicht des Verfassers gut dafür geeignet, Ergebnisse aus Modellrechnungen auf ihre Richtigkeit überprüfen zu können. Sie könnten auch gut dazu herangezogen werden, den großräumigen Massen- und Wärmeaustausch zwischen dem Polargebiet und den gemäßigten Breiten zu studieren, was einer Zielsetzung des geplanten internationalen POLAR-EXPERIMENTES ("POLEX") entspricht.

8. ZUSAMMENFASSUNG

Durch eingehende Berechnungen vieler Autoren in den letzten zwei Jahrzehnten hat man eine sichere Kenntnis erlangt über die zonalen Mittelwerte der verfügbaren potentiellen Energie und der meridionalen Transporte von sensibler und latenter Energie und von Drehmoment für die Atmosphäre der Nordhalbkugel. Daraus weiß man heute, daß in niederen Breiten die durch die mittlere Meridionalzirkulation hervorgerufenen Beiträge von Wichtigkeit sind, während in mittleren Breiten die großskaligen wandernden Wellen den größten Einfluß haben. Die horizontale Variabilität und die Veränderlichkeit von Jahr zu Jahr durch die wandernden Wellen hervorgerufenen verfügbaren potentiellen Energie und der meridionalen Transporte sind jedoch noch weitgehend unerforscht. Die in dieser Arbeit hierzu dargestellten Ergebnisse lassen sich folgenderweise zusammenfassen:

Durch die wandernden Wellen werden im Januar und Juli in der Umgebung von 50°N die größten Vorräte an verfügbarer poten-

tieller Energie hervorgerufen; während in vertikalen Profil im Januar ein ausgeprägtes Maximum in 500 mb vorhanden ist, findet man im Juli dagegen in der Vertikalen geringere Gegensätze vor. Das vertikalintegrierte Flächenmittel des sechsjährigen Gesamtzeitraumes 1967 bis 1972 ist im Januar doppelt so groß wie im Juli. Führt man eine zeitliche Aufschlüsselung in jeden einzelnen Januar und Juli aus dem Gesamtzeitraum durch, so findet man starke Unterschiede bei der durch die wandernden Wellen hervorgerufenen verfügbaren potentiellen Energie in den verschiedenen Januar- und Juli-Monaten vor. Eine anschauliche Erklärung dafür kann man den entsprechenden Horizontalverteilungen entnehmen. Man erkennt aus diesen, daß im Januar 1971 (in dem die durch die wandernden Wellen hervorgerufene verfügbare potentielle Energie ein Maximum aufweist) weite Bereiche nördlich und südlich der mittleren Lage der Polarfront hohe Werte an durch die wandernden Wellen hervorgerufener verfügbarer potentieller Energie aufweisen, während im Januar 1967 (Minimum) dies nur für einen schmalen bandartigen Bereich um die mittlere Lage der Polarfront herum der Fall ist. Im Januar 1971 erkennt man gut ausgeprägte Maxima über Amerika, Zentralasien und den Aleuten; im Januar 1967 sind diese dagegen nur schwach ausgeprägt und teilweise nur halb so groß. Im Unterschied zu den einzelnen Januar-Monaten ist die Variabilität bei den Juli-Monaten nur gering; die größten Werte der durch die wandernden Wellen hervorgerufenen verfügbaren potentiellen Energie liegen jetzt in jedem Fall südlich der mittleren Lage der Polarfront. Die Veränderlichkeit bezüglich der geographischen Länge ist in den einzelnen Juli-Monaten ebenfalls nur gering.

Sechsjährigen Mittelwert besitzt die verfügbare potentielle Energie der stehenden Wellen in 50°N ein Maximum, das sich zum Jd hin auf 30°N verschiebt. Diese Südwärtsverlagerung ist vor allem auf die Wellenzahl 1 zurückzuführen, und ist begründet durch die im Juli in 30°N sich wegen der unterschiedlichen Beckung mit Land und Meer einstellenden zonalen Temperatursätze. Man findet in jedem einzelnen Januar starke Maxima in beiden mittleren Kältezentren nördlich der mittleren Lage der Polarfront über Asien und Amerika und südlich der mittleren Lage der Polarfront in den Warmluftücken über den Indien und dem nördlichen Atlantik. Die Beträge der Maxima in den einzelnen Januar-Monaten unterscheiden sich dabei nur gering. Im Juli stellt die Polarfront dagegen keine Grenzfläche mehr zwischen den Extremwerten der durch die stehenden Wellen hervorgerufenen verfügbaren potentiellen Energie in horizontaler Richtung dar. Die größten Werte werden dabei in der Warmluft über dem Persischen Golf und den amerikanischen Weststaaten erreicht (sommerliche Hitzetiefdruckzentren); auch die im Sommer kältere Luft über dem Pazifik und dem Atlantik werden dagegen wesentlich geringere Beträge hervorgerufen.

Während im zonalen Mittel insgesamt durch die wandernden Wellen sensible und latente Energie nach Norden transportiert wird, kennt man aus den Horizontalverteilungen der vertikalen Mittelwerte, daß die Flüsse nicht überall gleichmäßig nach Norden gerichtet sind, sondern daß über bestimmten Gebieten die Umgekehrte der Fall ist. Man beobachtet eine starke Variabilität bezüglich der geographischen Länge. Während im Januar die

Zentren im Nordwärtstransport von sensibler Energie in der Umgebung von 40°N im Bereich der mittleren Lage der Polarfront zu finden sind, liegen diese im Juli weit südlich der mittleren Lage der Polarfront bei ca. 50°N . Durch die wandernden Wellen werden im Januar große Flüsse an latenter Energie bei starker horizontaler Veränderlichkeit bei ca. 30°N hervorgerufen, während dies im Juli für ca. 40°N der Fall ist; die Zentren finden sich in jedem Fall über den Ozeanen.

Durch die wandernden Wellen wird im Januar bei ca. 30°N und im Juli bei ca. 40°N westliches Drehmoment sehr kräftig nach Norden transportiert. Die Horizontalverteilungen zeigen dabei, daß es jedoch ausgedehnte Gebiete gibt, in denen ein Südwärts-transport erfolgt. Nördlich der mittleren Lage der Polarfront wird im Januar durch die wandernden Wellen überwiegend westliches Drehmoment nach Süden transportiert.

Die Berechnung der Spektren der verfügbaren potentiellen Energie und der meridionalen Flüsse von sensibler Energie und von Drehmoment am Ozeanwetterschiff "C" zeigen, daß in dem mit den synoptischen Störungen zusammenhängenden Periodenbereich von ca. 4 Tagen lediglich bevorzugt sensible Energie nach Norden transportiert wird, während für den Nordwärtstransport von Drehmoment die längerperiodischen Vorgänge von Wichtigkeit sind. Durch die synoptischen Störungen werden jedoch ebenfalls hohe Werte an verfügbarer potentieller Energie hervorgerufen.

Durch Betrachtung einiger ausgewählter besonders intensiver extratropischer Zyklonen kommt man zu dem Ergebnis, daß die mit der Entwicklung solcher Störungen verknüpften Transporte

von sensibler Energie und von Drehmoment, verglichen mit den Mittelwerten, äußerst intensiv sind und insgesamt nach Norden gerichtet sind.

DANKSAGUNG

diese Arbeit entstand in der Abteilung Meteorologie des Instituts für Meereskunde an der Universität Kiel im Rahmen eines Projektes über den Energiehaushalt und die Zirkulation der Atmosphäre. Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Fr. Defant für die Hinlenkung zu Arbeit auf diesem Gebiet, für sein Interesse und die wohlwollende Förderung der gesamten Untersuchungen während mehrerer Jahre. Ich danke meinen Kollegen, Herrn Dr. K. Arpe und Herrn Dr. H. Fechner, für die zahlreich geführten Diskussionen und die gute Zusammenarbeit besonders auf dem Gebiet der elektronischen Datenverarbeitung. Ebenso danke ich den Herren Dipl.-Math. J. Kießmann und Dr. J. Willebrand für die freundliche Überlassung des Spektralanalysenogrammes. Weiterhin gilt mein aufrichtiger Dank allen der Abteilung angehörenden Mitarbeitern, die in vielfältiger Weise an den Auswertungen beteiligt waren.

Das Projekt wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft finanziell gefördert, der ich hiermit meinen aufrichtigen Dank erstatte. Die Rechnungen und maschinellen Zeichnungen erfolgten im Rechenzentrum der Universität Kiel, dem ich für die stets sehr wohlwollende Behandlung meiner Datenverarbeitungs-Probleme danke. Ich danke weiterhin dem Deutschen Wetterdienst, der die Untersuchungen durch freundliche Bereitstellung der zahlreichen Daten auf Magnetbändern überhaupt erst möglich gemacht hat.

LITERATUR

- ADEM, A., Approximate methods for computing the mean water content of the atmosphere *Tellus* 20, 621-632, 1968.
- ARAI, Y., Approximate values of ultra-long waves, *J. Meteor.* 10, 418-433, 1971.
- ARAKAWA, A., H. KATAYAMA and J. MINTZ, Numerical simulation of the general circulation of the atmosphere, Proceedings of the WMO/IMGG Symposium on Numerical Weather Prediction in Tokyo, 1968-1969.
- ARPE, K., Die Darstellung von meteorologischen Feldern mit Hilfe von Kugelflächenfunktionen, in: Bericht an die Deutsche Forschungsgemeinschaft zum Sonderkonto De 122/23, 1971.
- BANSE, H., Experimentelle Untersuchungen der charakteristischen Temperaturverläufe der Polar- und Subtropenfront in verschiedenen Standardniveaus, Diplom-Arbeit Math.-Naturwiss. Fak. Univ. Kiel, 1973.
- BOGGARD, H.M.E., The daily meridional transfer of atmospheric water vapour between the tropics and 40N, *Tellus* 16, 43-54, 1964.
- BROOK, A.M., Transfer of water vapour from 2 km to 28 km at Laver, Victoria, during a solar sounding experiment, spring 1968, *Q. J. R. Meteor. Soc.* 97, 115-117, 1971.
- CHIU, WAN-CHENG, The spectra of large-scale turbulent transfer of momentum and heat, *J. Meteor.* 17, 435-441, 1960.
- CRUTCHER, L., Selected meridional cross sections of heights, temperatures and dew points of the northern hemisphere, Commander Naval Weather Service Command, Washington, D.C., NAVAIR-50-1C-59, 1969.
- CRUTCHER, H.L. and J.M. MESERV, Selected level heights, temperatures and dew points for the northern hemisphere, Commander Naval Weather Service Command, Washington, D.C., NAVAIR 50-1C-52, 1970.
- DEFANT, A., Die Zirkulation der Atmosphäre in den gemäßigten Breiten der Erde, *Geograph. Ann.* 3, 209-266, 1921.
- DEFANT, Fr., Die allgemeine atmosphärische Zirkulation in neuerer Betrachtungsweise, *Physica* 6, 189-217, 1958.
- DEFANT, Fr., H. FECHNER, P. SPIH, Synoptik und Energetik der Hamburger Sturmflutwetterlage vom Februar 1962, *Ber. Dt. Wetterd. I.* 127, 1-85, 1972.
- DEFANT, Fr., H. FECHNER, W. MEIR, P. SPETH, Die Berechnung des Vertikalgeschwindigkeitsfeldes der Hamburger Sturmflutwetterlage vom Februar 1962, *Meteor. Rdsch.* 26, 103-125, 1973.
- DICKSON, R.R., The weather and circulation of July 1967 (unusually cool east of the divide) *Monthly Weather Rev.* 95, 700-704, 1967.

- ESTOQUE, M.A., The spectrum of large-scale turbulent transfer of momentum and heat, *Tellus* 7, 177-185, 1955.
- FECHNER, H., Die kinetische Energie und der Transfer zwischen zonaler und turbulenter kinetischer Energie der Hamburger Sturmflutwetterlage vom Februar 1962, *Meteor. Rdsch.* 25, 69-81, 1972a.
- FECHNER, H., Die Leistung der Reibungskräfte in der Atmosphäre über Nordatlantik und Europa der Hamburger Sturmflutwetterlage 1962, *Meteor. Rdsch.* 25, 171-180, 1972b.
- FECHNER, H., Untersuchungen und Anwendungen der nordhemisphärischen (klimatologischen) Orthogonalfunktion des Geopotentials in 500 mb, persönliche Mitteilung, Veröffentlichung in Vorbereitung, 1973.
- FECHNER, H., Orthogonale Störfunktionen zur stetigen Darstellung von meteorologischen Feldern auf der Kugeloberfläche. Berichte aus dem Institut für Meereskunde Nr. 1, Kiel, 1974.
- FERREL, W., The motions of fluids and solids relative to the earth's surface, *Math. Monthly* 1, 1859.
- HADLEY, G., Concerning the cause of the general trade-winds, *Phil. Trans. Roy. Soc. London* 29, 58-62, 1735.
- HASTENRATH, S.L., On general circulation and energy budget in the area of the American Seas, *J. atm. Sci.* 23, 694-711, 1966.
- HASTENRATH, S.L., A study of the atmospheric energy budget between equator and 60°N during the winter and summer seasons, Part I: The latitude-mean conditions, *Beitr. Phys. Atm.* 41, 157-183, 1968.
- JEFFREYS, H., On the dynamics of geostrophic winds, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 52, 85-104, 1926.
- KASAHARA, A. and W.M. WASHINGTON, NCAR global circulation model of the atmosphere, *Monthly Weather Rev.* 95, 389-407, 1967.
- LEITH, C.E., Numerical simulation of the earth's atmosphere, *Methods in computational physics*, Vol. 4: Applications in Hydrodynamics, Academic Press, New York and London, 1965.
- LORENZ, E.N., Available potential energy and the maintenance of the general circulation, *Tellus* 7, 157-167, 1955.
- LORENZ, E.N., The nature and theory of the general circulation of the atmosphere, World Meteorological Organization, Genf, 1967.
- MARGULES, M., Über die Energie der Stürme, *Jahrbücher der K.K. Central-Anstalt für Meteorologie*, Neue Folge 40, 1-26, 1903.
- VAN MIEGHEM, The energy in the atmosphere for conversion into kinetic energy, *Beitr. Phys. Atm.* 20, 129-142, 1956.

- MINTZ, Y., Very long term global integration of the primitive equations of atmospheric motion, WMO Techn. Note 66, 141-167, 1965.
- PHILIPPS, N.A., The general circulation of the atmosphere: a numerical experiment, Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 82, 123-164, 1956.
- POSEY, J.W., The weather and circulation of January 1971: Amplification over the United States with a change in the temperature regime, Monthly Weather Rev. 99, 328-334, 1971.
- REITER, E.R., Mean and eddy motions in the atmosphere, Monthly Weather Rev. 97, 200-204, 1969.
- SCHERHAG, R. und Mitarbeiter, Klimatologische Karten der Nordhemisphäre, Meteor. Abh. Freie Univ. Berlin, 100 (1), 1969.
- SCHERHAG, R. und Mitarbeiter, Der jährliche Witterungsverlauf über der Nordhemisphäre, Meteor. Abh. Freie Univ. Berlin, 100 (2), 1970.
- ELLERS, W.D., Physical Climatology, Univ. of Chicago Press, Chicago, 1965.
- IGORINSKY, J., S. MANABE and J.L. HOLLOWAY, Numerical results from a nine-level general circulation model of the atmosphere, Monthly Weather Rev. 93, 727-768, 1965.
- RETH, P., Die verfügbare potentielle Energie und der Transfer zwischen zonaler und turbulenter verfügbarer potentieller Energie der Hamburger Sturmflutwetterlage vom Februar 1962, Beitr. Phys. Atm. 45, 121-147, 1972a.
- RETH, P., Die Umsetzung zwischen verfügbarer potentieller und kinetischer Energie der Hamburger Sturmflutwetterlage vom Februar 1962, Arch. Meteor. Geophys. Bioklimat. A 21, 45-74, 1972b.
- RETH, P., Energetische Vergleichszahlen für Modellrechnungen der Allgemeinen Atmosphärischen Zirkulation, Meteor. Rdsch. 27, im Druck, 1974a.
- RETH, P., Horizontale Flüsse von sensibler und latenter Energie und von Impuls für die Atmosphäre der Nordhalbkugel, Meteor. Rdsch. 27, im Druck, 1974b.
- RETH, P., Mittlere Meridionalschnitte der verfügbaren potentiellen Energie für jeden Januar und Juli aus dem Zeitraum 1967 bis 1972, Berichte aus dem Institut für Meereskunde Nr. 2, Kiel, 1974c.
- RETH, P., Mittlere Horizontalverteilungen der Temperatur und der verfügbaren potentiellen Energie und mittlere Meridionalschnitte der Temperatur für jeden Januar und Juli aus dem Zeitraum 1967 bis 1972, Berichte aus dem Institut für Meereskunde Nr. 3, Kiel 1974d.

- SPETH, P., Die Anwendung orthogonaler Vektorfunktionen auf die Analyse meteorologischer Felder, Meteor. Rdsch. 27, im Druck, 1974e
- STARR, V.P., Applications of energy principles to the general circulation, in: Compendium Meteorology, Thomas F. Malone (Ed.), American Meteorological Society, 568-574, 1951.
- STARR, V.P., Note concerning nature of the large-scale eddies in the atmosphere, Tellus 5, 494-498, 1953.
- STARR, V.P., Further statistics concerning the general circulation, Tellus 11, 481-, 1959.
- STARR, V.P., Physics of negative viscosity phenomena, McGraw-Hill, Inc., New York, 66.
- STARR, V.P., An essay on the general circulation of the earth's atmosphere, J. Geophys. Res. 53, 39-43, 1948.
- STARR, V.P. and R.M. WHITE, Schemes for the study of hemispheric exchange processes, Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 78, 407-410, 1952.
- TAUB, R.E., Weather and circulation of July 1972 (record cold in the northern Great Plains and northern Rocky Mountains), Monthly Weather Rev. 100, 751-756, 1972.
- THOMPSON, J., On the general currents of atmospheric circulation, Phil. Trans. Roy. Soc. London 183, 653-684, 1892.
- VON DER HAAR, T.H. and V.E. ROMI, Measurement of the earth's radiation budget from satellites during a five-year period, Part I: Extended time and space means, J. atm. Sci. 28, 305-314, 1971.
- TORELA, L.A. and I. TUOMINIEMI, On the mean zonal and meridional circulations and flux of moisture in the northern hemisphere during the summer season, Pure Appl. Geophys. 57, 167-180, 1966.
- WILSON, E.W., Climatological studies of the large-scale circulation in the northern hemisphere, I. Zonal and meridional indices at the 7mb-level, Monthly Weather Rev. 100, 553-564, 1972.
- WILSON, R.M., The role of mountains in the angular momentum balance of the atmosphere, J. Meteor. 6, 353-355, 1949.
- WILSON, R.M., The meridional exchange flux of energy, Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 77, 19-199, 1951.
- WILSON, W.R., The weather and circulation of January 1967: A mild month with unusual high zonal index, Monthly Weather Rev. 95, 227-233, 1967.

1D METEOROLOGICAL ORGANIZATION, ort-period averages for
1951-1960 and provisional erage values for climat
TEMP and climat TEMP ship ations, WMO/OMM - No. 170.TP/67
1965.

1D METEOROLOGICAL ORGANIZATION, Cmission for Climatology,
Report of the fifth session: CCL-V/Doc. 36, 26.8.1969.